

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**Departamento de Ingeniería Química**



**TESIS DOCTORAL**

**Contribución al estudio analítico y físico-químico del sistema  
cementos puzolanicos-yeso-agua**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
PRESENTADA POR

**Rafael Talero Morales**

DIRECTOR:

**Demetrio Gaspar Tébar**

**Madrid, 2015**

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Facultad de Ciencias Químicas

Departamento de Química Industrial

TP  
1988  
254



\* 5 3 0 9 8 7 6 5 7 3 \*

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

x-53-044313-8

**CONTRIBUCION AL ESTUDIO ANALITICO Y  
FISICO-QUIMICO DEL SISTEMA CEMENTOS  
PUZOLANICOS — YESO — AGUA**

Rafael Talero Morales

Madrid, 1988



**Colección Tesis Doctorales. N.º 254/88**

**© Rafael Talero Morales**

**Edita e imprime la Editorial de la Universidad  
Complutense de Madrid. Servicio de Reprografía  
Noviciado, 3 - 28015 Madrid  
Madrid, 1988  
Ricoh 3700  
Depósito Legal: M-8016-1988**

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS  
DEPARTAMENTO DE QUIMICA INDUSTRIAL

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
EN QUIMICA INDUSTRIAL QUE PRESENTA  
EL LICENCIADO EN CIENCIAS QUIMICAS  
RAFAEL TALERO MORALES

CONTRIBUCION AL ESTUDIO ANALITICO Y FISICO-QUIMICO  
DEL SISTEMA CEMENTOS PUZOLANICOS - YESO - AGUA

Director de la Tesis Doctoral  
D. DEMETRIO GASPAS TEBAR  
Dr. en Ciencias Químicas  
Prof. de Investigación del C.S.I.C.

Madrid - 1986



### AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a :

- Lcdo. D. Pablo García de Paredes y Gaibrois (†), por haber sido el promotor de la idea matriz e impulsor de la motriz de este trabajo.
- D. Manuel Cantero Palacios y D. Felipe Cantero Palacios, por sus enseñanzas y/o facilidades proporcionadas para la realización de este trabajo.
- Prof. Dr. D. Demetrio Gaspar Tebar, por haber accedido generosamente a sustituir en su día, al Prof. Dr. D. José Calleja Carrete, en la dirección de esta Tesis Doctoral.
- Prof. Dr. D. Angel Vián Ortuño, por sus acertados consejos para la plasmación de determinados pasajes de este trabajo.
- Prof. Dr. D. Julio Tijero Miquel, por su amabilidad al aceptar la ponencia de esta Tesis Doctoral, y
- al Instituto "Eduardo Torroja" de la Construcción y el Cemento, del C.S.I.C., por las facilidades y medios proporcionados para la realización de este trabajo; y dentro del mismo y muy especialmente a todas las personas que lo han formado y constituido hasta nuestros días y que de algún modo me han proporcionado más y mejor tales medios y facilidades para poder llevarlo a cabo.

EL AUTOR

Dadas las premuras de tiempo que, por razones diversas y que no vienen al caso, rodearon

- la edición de esta MEMORIA, para poder realizar su lectura oficial, y
- su re-edición posterior, para darla a conocer a los especialistas del ramo,

se piden excusas por las erratas tipográficas y/o mecanográficas, etc., que tanto por defecto como por exceso aún aparezcan en la misma y que de algún modo pudieran quizás llegar a ser motivo de confusión o duda para algunos de sus lectores, causa por la cual pedimos excusas y quedamos a su entera disposición para aclarárselas si fuera necesario.

EL AUTOR

100-  
101-  
102-

INDICE



I N D I C E

	<u>Pag.</u>
I.- PREAMEULO .....	1
I.1.- Generalidades .....	2
I.2.- Nomenclatura Química del Cemento .....	3
I.3.- Consideraciones Diversas .....	3
II.-PROLOGO .....	18
III.-INTRODUCCION .....	22
IV.-GENEALIDADES SOBRE EL ATAQUE DE LOS CEMENTOS POR IONES SULFATO: .....	26
IV.1.- Causas del mismo: Formación de Sulfato-aluminatos de calcio hidratados expansivos .....	27
IV.2.- Reacciones de hidratación del cemento que, en teoría, llevan ó pueden llevar implícito, en mayor o menor grado, un aumento de volumen. Reacciones Expansivas: .....	39
IV.2.1.- Formación de compuestos hidratados a partir de los compuestos mineralógicos del clíinker .....	40
IV.2.2.- Formación de yeso "secundario" a partir de sulfatos alcalinos y/o alcalinoterreos ajenos al propio cemento y que en forma de disolución acuosa entran en contacto con él. ....	41
IV.2.3.- Formación de diversos sulfato-aluminatos de calcio hidratados, mas o menos expansivos .....	42
IV.3.- Generalidades sobre la Resistencia de los Sulfatos de los Cementos Portland. Consecuencias: Especificaciones existentes .....	44
IV.4.- Generalidades sobre la Resistencia a los Sulfatos de los Cementos Puzolánicos .....	51
IV.5.- Generalidades sobre Puzolanas:	
IV.5.1.- Definiciones y Conceptos: Consecuencias .....	59
IV.5.2.- Alúmina Reactiva de las Puzolanas: Formación de Sulfato-Aluminatos de Calcio Hidratados .....	78
IV.5.3.- Acción Positiva (+), Negativa (-) ó Nula (±) de las Adiciones Puzolánicas, ó no, en la Resistencia de los Cementos Portland ante el Ataque de los Iones Sulfato. Casos Prácticos .....	88
IV.5.4.- Efecto Protector de las Puzolanas a los Cementos Portland: Causas Probables y Discrepancias Posibles .....	90
IV.6.- Consecuencias de las Generalidades sobre la Resistencia Sulfática de los Cementos Portland, de los Cementos PA y PUZ y de las Puzolanas y su Medición y Control antes de su Puesta en Obra: Necesidad de Métodos Acelerados de Ensayo para su Cuantificación y Cualificación previa correspondiente. Parámetros calibratorios utilizados en cada uno de ellos. Consecuencias ...	104



	<u>Pag.</u>
IV.6.1.- Razones de la elección de los dos métodos acelerados de ensayo Le Chatelier-Anstett (L-A) y ASTM C 452 - para la realización de este trabajo: Descripción somera de los mismos y parámetros determinados en cada uno de ellos .....	109
V.- OBJETIVOS .....	114
VI.- FUNDAMENTOS .....	116
VI.1.- Fundamentos Generales .....	117
VI.1.1.- Fundamentos Teóricos:	
VI.1.1.1.- Principales .....	121
VI.1.1.2.- Secundarios .....	127
VI.1.2.- Fundamentos Prácticos:	
VI.1.2.1.- Selección de Materiales .....	130
VI.1.2.1.1.- Razones Cualit y Cuantitativas de la misma .....	130
VI.1.2.1.2.- Análisis, Definición y Estudio, en su caso, de los diversos materiales seleccionados para la realización de este trabajo: Conclusiones VI.1.2.1.2(c)..	145
VI.1.2.2.- Marcha Operatoria .....	153
VII.- PARTE OPERATORIA PREVIA .....	154
VII.1.-Objetivos Puntuales .....	155
VII.2.-Cálculo y Dosificación de Materiales para la Formación de Ettringita Sintética de Distinto Origen y Etiología: "Fratinitis Selenitosos" .....	158
VII.2.1.- A partir de Cementos Portland sólo y/o mezclados con Puzolanas únicamente .....	158
VII.2.2.- A partir de Puzolanas .....	159
VII.3.-Realización de los Ensayos de la Parte Operatoria Previa .....	161
VII.4.-Resultados Experimentales Obtenidos .....	162
VII.4.1.- Discusión e Interpretación correspondiente :	
VII.4.1.1.- De los Cementos Portland, P-31, P-1 y PY-6, sólo, con 7,0% y 21,0% de SO <sub>3</sub> , respectivamente. Estudio comparativo correspondiente .....	163
VII.4.1.2.- De las Puzolanas D, O, A, C y M, con Ca(OH) <sub>2</sub> R.A., y con 7,0% y 21,0% de SO <sub>3</sub> , respectivamente. Estudios comparativos correspondientes de éstas entre si y frente a aquellos .....	169
VII.4.1.3.- De los Cementos Puzolánicos, PUZ, PY-6/D 70/30, - PY-6/O 70/30, PY-6/A 70/30, PY-6/C 70/30 y PY-6/M 70/30, sólo 6 de forma individualizada, con 7,0% y 21,0% de SO <sub>3</sub> , respectivamente. Estudio comparativo correspondiente .....	179

	<u>Pag.</u>
VII.4.2.- Conclusiones .....	191
VII.4.3.- Comentario Final .....	194
VIII.- PARTE OPERATORIA FUNDAMENTAL .....	196
VIII.1.- Estudio del Comportamiento Frente al Ataque de los Iones Sul- fato de los Cementos P, PY, <u>PA</u> , <u>PUZ</u> y PUZ Seleccionados, Ele- gidos y/o Preparados para este trabajo, mediante el Método - Acelerado de Ensayo Le Chatelier-Anstett:	
VIII.1.1.- Técnica Operatoria .....	201
VIII.1.2.- Resultados Experimentales Obtenidos:	
VIII.1.2.1.- De los doce Cementos Portland, 6 P y 6 PY solos: Discusión e Interpretación .....	203
VIII.1.2.2.- De los Cementos de Mezcla <u>PA</u> y/o <u>PUZ</u> y PUZ in- dustriales:	
VIII.1.2.2.1.- Cementos de Mezcla preparados con la Puzolana Referencial Silícea D: Discusión e Interpre- tación.....	211
VIII.1.2.2.2.- Cementos de Mezcla preparados con la Puzolana Referencial Aluminica M: Discusión e Interpre- tación .....	229
VIII.1.2.2.3.- Cementos de Mezcla preparados con las Puzola- nas Industriales, O, A, C, CV-10 y CV-19: Estudio Comparativo con las Puzolanas Referen- ciales D y M: Discusión e Interpretación ....	258
VIII.1.2.2.4.- Ejemplos Prácticos de ocho Cementos Puzoláni- cos Industriales Ensayados según el método - L-A: Discusión e Interpretación .....	303
VIII.2.- Estudio del Comportamiento Frente al Ataque de los Iones Sul- fato de los Cementos, P, PY, <u>PA</u> , <u>PUZ</u> y PUZ Seleccionados, - Elegidos y/o Preparados para este trabajo, mediante el Méto- do Acelerado de Ensayo ASTM C 452:	
VIII.2.1.- Técnica Operatoria .....	306
VIII.2.1.1.- Aparatos y/o Técnicas Experimentales y/o Analí- ticas empleadas para la determinación de cada - uno de los parámetros considerados en cada tipo de probeta .....	309

	<u>Pag.</u>
VIII.2.2.- Resultados Experimentales Obtenidos:	
VIII.2.2.1.- De los doce Cementos Portland 6P y 6PY, solos. - Discusión e Interpretación .....	310
VIII.2.2.2.- De los Cementos de Mezcla <u>PA</u> y/o <u>PUZ</u> y <u>PUZ</u> indus- triales:	
VIII.2.2.2.1.- Cementos de Mezcla Preparados con la Puzolana Referencial Silícica D: Discusión e Interpre- tación .....	338
VIII.2.2.2.2.- Cementos de Mezcla Preparados con la Puzolana N:	
VIII.2.2.2.2.1.- Estudio Individualizado de la Puzolana N : - Discusión e Interpretación .....	360
VIII.2.2.2.2.2.- Estudio Analítico Comparativo de la Puzolana N con la Referencial Silícica D: Discusión e Interpretación .....	367
VIII.2.2.2.3.- Cementos de Mezcla Preparados con la Puzolana Referencial Aluminica M: Discusión e Interpre- tación .....	394
VIII.2.2.2.4.- Cementos de Mezcla Preparados con las Puzolanas Industriales C, A y C : Discusión e Interpre- tación .....	437
VIII.2.2.2.5.- Cementos de Mezcla Preparados con las Puzolanas Industriales CV-10 y CV-19: Discusión e Inter- pretación .....	449
VIII.2.2.2.6.- Estudio Comparativo de las Puzolanas Silícicas D y N con la Aluminica M, a través de sus Ce- mentos de Mezcla <u>PA</u> y/o <u>PUZ</u> correspondientes, ensayados mediante el método ASTM C 452: Dis- cusión e Interpretación .....	454
VIII.2.2.2.7.- Estudio Comparativo de las Puzolanas D, N, O, A, C, M, CV-10 y CV-19, a través de sus Cemen- tos de Mezcla <u>PA</u> y/o <u>PUZ</u> correspondientes, en- sayados mediante el método ASTM C 452: Discu- sión e Interpretación .....	465
VIII.2.2.2.8.- Ejemplos Prácticos de ocho Cementos Puzoláni- cos Industriales ensayados según el método - ASTM C 452-68: Discusión e Interpretación ....	491

	<u>Pag.</u>
VIII.3.- Estudio del Comportamiento Frente al Ataque de los Iones Sulfato de los Cementos P, PY, <u>PA</u> , <u>PUZ</u> y <u>PUZ</u> , Seleccionados, Eligidos y/o Preparados para este trabajo, mediante el Método - Acelerado de Ensayo HIBRIDO-1	
VIII.3.1.- Razones de la hibridación de los métodos acelerados de ensayo L-A y ASTM C 452 .....	496
VIII.3.2.- Técnica Operatoria: Cálculo y Determinación de la Dosificación del Mortero y del Agua de Amasado y - Conservación de las Probetas .....	499
VIII.3.3.- Resultados Experimentales Obtenidos	
VIII.3.3.1.- De los doce Cementos Portland, 6 P y 6 PY, solos: - Discusión e Interpretación .....	500
VIII.3.3.2.- De los Cementos de Mezcla <u>PA</u> y/o <u>PUZ</u> y <u>PUZ</u> : Razones de su preparación y ensayo .....	524
VIII.3.3.2.1.- Cementos de Mezcla Preparados con Cemento Portland de contenido elevado de $C_3A$ , el P-1, y - las Puzolanas D, N, O, A, C y M, respectivamente, 60/40, en peso: Discusión e Interpretación	527
VIII.3.3.2.2.- Cementos de Mezcla Preparados con Cemento Portland de contenido prácticamente nulo de $C_3A$ , - el PY-4 y el PY-6, respectivamente y cada una de las Puzolanas siguientes, D, N, O, A, C ó M 80/20, en peso: Discusión e Interpretación ...	543
VIII.3.3.2.3.- Cementos de Mezcla Preparados con Cemento Portland de contenido mediano, bajo, escaso ó prácticamente nulo de $C_3A$ y las Puzolanas, D, N, O, A, C, M, CV-10 y CV-19, indistintamente :	
VIII.3.3.2.3.1.- Cementos de Mezcla preparados con Cementos - Portland de mediano ó prácticamente nulo contenido de $C_3A$ , el P-31, el P-5, el PY-4 y el PY-6, respectivamente y Puzolana Común la N, 80/20 en peso, y de elevado a escaso contenido de $C_3A$ , el P-1 y el PY-1, respectivamente, y Puzolana Común la M, o sea el (P-1/M 60/40) y (PY-1/M 60/40): Discusión e Interpretación. Conclusiones .....	551
VIII.3.3.2.3.2.- Cementos de Mezcla preparados con Cementos - Portland de contenido mediano de $C_3A$ , el P-31 y Puzolana Común la N, 80/20, 70/30 y 60/40, en peso, respectivamente: Discusión e Interpretación .....	563

	<u>Pag.</u>
VIII.3.3.2.3.3.- Cementos de Mezcla preparados con Cementos Portland de mediano contenido de $C_3A$ , el P-31 y Puzolanas N, CV-10 y CV-19, respectivamente, 70/30, en peso: Discusión e Interpretación .....	567
VIII.3.3.2.3.4.- Cementos de Mezcla preparados con Cementos Portland de contenido elevado o mediano de $C_3A$ , el P-1 y el P-31 respectivamente, y Puzolana Común N, 60/40, en peso: Discusión e Interpretación .....	573
VIII.3.3.2.3.5.- Cementos de Mezcla preparados con Cementos Portland de contenido escaso a prácticamente nulo de $C_3A$ , el PY-1, el PY-4 y el PY-6 respectivamente, y Puzolana común M, 80/20 en peso: Discusión e Interpretación .....	584
VIII.3.3.2.3.6.- Ejemplos Prácticos de ocho Cementos Puzolánicos PUZ industriales ensayados según el método HIBRIDO-1: Discusión e Interpretación .....	590
VIII.3.3.3.- Comentario Final .....	591
IX.- CONCLUSIONES GENERALES .....	593
X.- DEDUCCIONES DE INTERES .....	595
XI.- CONSEJOS PRACTICOS GENERALES .....	622
XII.- APLICACIONES .....	641
1º Grupo: Calificación (y Cualificación en su caso) de un Cemento Portland solo, P ó PY, o de Mezcla con Puzolana(s) únicamente, o a la(s) Puzolana(s) que lo(s) constituye(n) - para un fin dado, mediante los métodos acelerados de ensayo	
• Le Chatelier-Anstett: Parámetro empleado $\Delta\bar{L}_{xd}(\%)$ , y/o .....	643
• ASTM C 452 : Parámetros empleados, $\Delta\bar{L}_{xd}(\%)$ y/o RMF <sub>xd</sub> y/o RMC <sub>xd</sub> y/o .....	659
• HIBRIDO-1 : Parámetros empleados, $\Delta\bar{L}_{xd}(\%)$ y/o RMF <sub>xd</sub> y/o RMC <sub>xd</sub> .....	676
2º Grupo: Calificación de un Cemento Portland solo, P ó PY, o de Mezcla con Puzolana(s) únicamente mediante el Parámetro LIMITE DE RESISTENCIA SULFATICA, LRS .....	
677	
3º Grupo: Determinación de la DOSIFICACION MAS APROPIADA DE UN CEMENTO DE MEZCLA constituido únicamente por Cemento Portland (ó Clinker Portland), Puzolana(s) y Yeso para un fin dado y sus posibles repercusiones tecnológicas en la Fabricación y Control de Calidad de tal(es) Cemento(s) de Mezcla y similares.	

Pag.

- Definición y Determinación de la ACCION SINERGICA MAXIMA de un Cemento de Mezcla PA o PUZ (ó mejor de su(s) Puzolana(s) constitutiva(s) en exclusiva) .....	679
- Definición y Determinación del OPTIMO DE YESO (ú "Optimo de $SO_3$ ") de un Cemento de Mezcla PA y/o PUZ constituido - únicamente por Portland y Puzolana(s) .....	681
4º Grupo: Condiciones Generales de Encofrado, Hormigonado, Desencofrado y Curado de un Hormigón tradicional preparado con Cemento Portland (ó Clinker Portland) Puzolana(s) eminentemente "silícicas" ó "alumínicas", según el caso, y Yeso .....	685
5º Grupo: Extrapolación de las características aplicatorias de las Puzolanas silícicas D y N y alumínica M empleadas en este trabajo a sus afines y similares, ya naturales o artificiales, respectivas .....	689
XIII.- COROLARIO .....	694
XIV.- BIBLIOGRAFIA .....	696



I.- PREAMBULO



## I.- P R E A M B U L O

### I.1. Generalidades

El notable atractivo y mejor interés de que siempre han gozado los cementos con adiciones hidráulicamente activas, o simplemente activas, tanto entre los investigadores, como entre los fabricantes y usuarios del ramo, se ha visto reflejado tradicionalmente aquí en España, gracias a la amplia extensión de terrenos yesíferos, amén de otras sales, de la Península Ibérica y sus costas (causas "históricas" a nivel nacional), habiéndose incrementado de siempre tal atracción e interés citados, gracias al beneficio económico que su utilización comporta.

Todo ello ha venido a poner en evidencia la necesidad urgente de su utilización, de aquí que actualmente en España esté permitido, en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la recepción de Cementos (RC-75), B.C. del E. nº 206, p. 18197 y nº 207, p. 18299 a 18311, (1), el empleo de las mismas, de modo, manera y cuantía que los cementos con adiciones activas son, de hecho, numerosos, clasificándose actualmente en tres grandes grupos según la cantidad o la clase de adición que tengan, como se señala en la Tabla 1. Y de modo similar en el anterior, PCCH-64 (2).

Igualmente y a nivel europeo, los estudios que se están realizando en el seno de la TC-51, del Comité Europeo de Normalización (CEN) y que se encuentra en fase muy avanzada, clasifica a los cementos en los siguientes tipos, véase Tabla 2.

De todo ello se deduce la necesidad urgente de llevar a cabo estudios metodológicos concretos para determinar la RESISTENCIA, de tales cementos, particularmente y en este caso PA y PUZ, AL ATAQUE POR LOS IONES SULFATO, los cuales y hasta hoy han venido siendo muy abundantes, contradictorios y confusos, tanto en el fondo (estudio cualitativo), como en la forma (estudio cuantitativo), hechos ambos, que llevan consigo la necesidad imperiosa de disponer de métodos acelerados de ensayo que permitan predecir con fundamento, el probable comportamiento de dichos cementos en tales medios agresivos, así como también explicar en lo posible la(s) causa(s) del comportamiento real de la(s) adición(es) activa(s) que lo(s) constituye(n), tanto en dicho medio agresivo como en aquel otro que no lo es, que es el caso mas común de empleo de la(s) misma(s).

Por otra parte, el empleo de las adiciones hidráulicamente activas, o simplemente activas, sigue significando, como decíamos, un ahorro energético, a cuya meta final o consumo mínimo de energía, por este camino, aún no se ha llegado. Este hecho, por sí sólo, es de máxima trascendencia económica para España, pues de esta manera se colaborará para poder tener una menor dependencia de las fluctuaciones de precios del mercado de combustibles con las consecuencias pertinentes para todos y en especial para el cemento y sus fábricas, al ser éste un factor fundamental en el contexto industrial nacional de la cons

Finalmente y en vista de que el estudio causal de la resistencia al ataque de los iones sulfato, tanto de los cementos de elevado contenido de adiciones activas (>40%, en peso), como de los de bajo contenido (<40%, en peso) aún no se han completado, como se verá, con un estudio INTEGRAL al respecto, ya que si bien, y desde un punto de vista tecnológico, mientras que los primeros (que emplean como adiciones activas mas comunes las escorias siderúrgicas) están sancionados por la práctica, de los segundos no ocurre otro tanto, es por lo que, obviamente, habrán de ser a estos últimos a los que se les tenga que prestar mayor atención, y dentro de los mismos, sólo a aquellos que tienen como adiciones activas a las PUZOLANAS en exclusiva, que es de lo que se ha tratado en la presente MONOGRAFIA y sus afines venideras.

#### I.2. Nomenclatura Química del Cemento

A continuación se indica, en las Tablas, 3, 4 y 5, la nomenclatura de los compuestos, materiales anhidros y/o tratados, conceptos, parámetros y/o técnicas operatorias diversas, así como su notación, formulación química y abreviaturas correspondientes, de acuerdo con la Química y Técnica del Cemento, implicados de algún modo en este trabajo.

#### I.3. Consideraciones previas

- 1ª.- Se ha de hacer constar que la resistencia de los cementos a las aguas y/o terrenos agresivos, y más concretamente a los sulfáticos, ha sido, por lo general, uno de los temas más estudiados y experimentados, a escala real y de laboratorio, tratándose de determinar, casi siempre, el comportamiento de los cementos en dichos medios agresivos, mas que el mecanismo de los fenómenos físico-químicos que pudieran tener lugar, como lo demuestra la amplia bibliografía existente en este sentido, la cual ya en 1952 era tan numerosa, interesante y concreta en este aspecto, que indujo, por encargo, a los investigadores Dalton G. Miller, Philip W. Manson y Robert T.H. Chen componentes todos ellos del Comité C-1, de Cementos de A.S.T.M., a su recopilación bibliográfica, en forma de abstractos, ordenados por orden alfabético (3). Y en igual sentido F. Young (4) años mas tarde.
- 2ª.- Normalmente se habla en este campo de los cementos y su utilización, de la "Resistencia de los Cementos a los Sulfatos", compendiando de algún modo y quizá sin propósito alguno, en dicha frase, a todos los sulfatos existentes. Pues bien, se ha de hacer constar que dicha frase es una deformación que hay que evitar y corregir, ya que es necesario señalar la naturaleza catiónica de la sal sulfática de donde procede dicho anión, por la influencia que puede tener dicho catión "acompañante" en los procesos físico-químicos que haya lugar, de aquí que, al emplear como agresivo, en este trabajo, el sulfato de calcio dihidrato natural (piedra de yeso natural):
  - a) porque el catión acompañante del anión sulfato sería el  $\text{Ca}^{2+}$  el cual

no es químicamente agresivo para ninguno de los componentes mineralógicos anhidros o hidratados del cemento, y

b) por las características geológicas, como veremos, de los suelos españoles, parece ser más exacto y científico el hablar de "Resistencia de los Cementos al Ataque de los Iones Sulfato, en general, y de calcio (yeso) en particular" por lo que de esta manera, y no de aquella, se expresará el concepto en cuestión cuantas veces sea necesario exponerlo a lo largo de la presente memoria. De todo lo cual se deduce que cuando aparezca aquella expresión y no ésta, ha de atribuírsele al investigador correspondiente.

3ª - A lo largo de este trabajo aparecerán en bastantes ocasiones las frases:

a) "ataque sulfático" que significará por tanto "ataque por los iones sulfato" única y exclusivamente, de aquí que sólo pueda hacerse extensible y concretarse únicamente al ataque yesífero o selenitoso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  = Yeso), que ha sido, como se verá, el agresivo empleado, por las razones citadas, en este trabajo.

b) un cemento portland solo o de mezcla se puede definir como de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato", que significa que dicho cemento solo o de mezcla, per se, o sea por su peculiar constitución química, tiene la facultad de poder resistir más y mejor al ataque de los iones sulfato, por lo que según ello la frase entrecomillada al principio se debería poner con más propiedad del siguiente modo ".... definir como de elevada resistencia química al ataque de los iones sulfato"; no obstante y por brevedad expositiva se pondrá siempre aquella y no ésta.

c) AUMENTAR o "mejorar" el grado de resistencia o simplemente la resistencia a secas, al ataque de los iones sulfato o su equivalente, "resistencia" al ataque yesífero o selenitoso del cemento P o PY matriz, que significa que el cemento de mezcla PA o PUZ resultante tiene un comportamiento ante dicho ataque, mejor o superior al de su cemento matriz acompañante correspondiente P o PY solo, es decir, resiste más y mejor al citado ataque que dicho P o PY solo, esto es, que tales cementos P o PY con la puzolana añadida, en sustitución física o mejor suplantación de parte de los mismos, resiste más y mejor el mencionado ataque agresivo que cuando estaban solos, o sea, sin la puzolana en cuestión, en cuyo caso se podría decir que la misma comunica y quizás posea propiedades "anti-ataque sulfático" o simplemente propiedades "anti-sulfato"

d) DISMINUIR o "empeorar" o "no mejorar" el grado de resistencia, al ataque de los iones sulfato del cemento matriz acompañante correspon-

### Nomenclatura Química del Cemento : Fórmulas y Abreviaturas

Comuestos del Cemento				
Nombre Científico	Nombre Mineralógico	Notación según Quínica Cemento	Fórmula Quínica	Abreviatura empleada en este trabajo
<b>(A).- Compuestos Anhidros :</b>				
- Silicato Tricálcico	"Alita"	$C_3S$	$3CaO.SiO_2$	Al
- Silicato Bicálcico	"Belita"	$C_2S$ (pyf)	$2CaO.SiO_2$	B1
- Aluminato Tricálcico	"Celita"	$C_3A$	$3CaO.Al_2O_3$	C1
- Aluminio-Ferrito Tetracálcico	"Brownillerita"	$C_4AF$	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	Bw
- Ferrito Bicálcico		$C_2F$	$2CaO.Fe_2O_3$	Fb
- Aluminato Tetracálcico		$C_4A$		At
- Aluminato Monocálcico		CA		Am
<b>(B).- Compuestos Hidratados :</b>				
- Silicatos de calcio hidratados		$C_3S \cdot \frac{4}{x} y z$		
- Silicato Monocálcico Hidratado	"tobermorita"	CSH	$CaO.SiO_2 \cdot \frac{4}{2} H_2O$	CSH
- Geles tobermorfíticos de neoformación y origen $SiO_2$ de una puzolana X		CSH $SiO_2$		
- Silicato Bicálcico Hidratado	"Afilita"	$C_3S \cdot \frac{4}{2} H_2O$	$3CaO.2SiO_2 \cdot 3H_2O$	
- Aluminato Monocálcico Hidratado		$CAH_z$	$CaO.Al_2O_3 \cdot zH_2O$	
- Aluminatos de Calcio Hidratados		$C_4A \cdot \frac{4}{x} y z$		
- Silicato-Aluminato de Calcio	"Cenlenita"	$C_2AS$	$2CaO.Al_2O_3.SiO_2$	S
- Idem. Hidrato	"Cenlenita hidratado"	$C_2ASH_6$	$2CaO.Al_2O_3.SiO_2 \cdot 6H_2O$	Sh
- Trisulfato-Aluminato de Calcio Hidratado	"Etringita"			Et
- Monosulfato-Aluminato de Calcio Hidratado	"Fase AFa"			As
- Sulfato-Aluminatos de Calcio Hidratados				SACH
- Sulfato-Ferritos de Calcio Hidratados				SFCH
- Sulfato-Silicatos de Calcio Hidratados				SSCH
- Hidróxido de Calcio ó "Portlandita"		CH	$Ca(OH)_2$	

**TABLA 1**  
**TABLA DE TIPOS DE CEMENTO, (AC-703), MAS O MENOS**  
**AFINES CON ESTE TRABAJO**

CEMENTOS		Compressive (N to steel)		Tensile Stress
Designation	Grade	Concrete Cylinder Strength	Steel	
- Type I	0	900	-	-
- Type II	1	900	-	-
- Type III	2	900	210	1000
- Type IV	3	900	210	1000
- Type V	4	900	210	1000
- Type VI	5	900	210	1000
- Type VII	6	900	210	1000
- Type VIII	7	900	210	1000
- Type IX	8	900	210	1000
- Type X	9	900	210	1000
- Type XI	10	900	210	1000
- Type XII	11	900	210	1000
- Type XIII	12	900	210	1000
- Type XIV	13	900	210	1000
- Type XV	14	900	210	1000
- Type XVI	15	900	210	1000
- Type XVII	16	900	210	1000
- Type XVIII	17	900	210	1000
- Type XIX	18	900	210	1000
- Type XX	19	900	210	1000
- Type XXI	20	900	210	1000
- Type XXII	21	900	210	1000
- Type XXIII	22	900	210	1000
- Type XXIV	23	900	210	1000
- Type XXV	24	900	210	1000
- Type XXVI	25	900	210	1000
- Type XXVII	26	900	210	1000
- Type XXVIII	27	900	210	1000
- Type XXIX	28	900	210	1000
- Type XXX	29	900	210	1000
- Type XXXI	30	900	210	1000
- Type XXXII	31	900	210	1000
- Type XXXIII	32	900	210	1000
- Type XXXIV	33	900	210	1000
- Type XXXV	34	900	210	1000
- Type XXXVI	35	900	210	1000
- Type XXXVII	36	900	210	1000
- Type XXXVIII	37	900	210	1000
- Type XXXIX	38	900	210	1000
- Type XXXX	39	900	210	1000
- Type XXXXI	40	900	210	1000
- Type XXXXII	41	900	210	1000
- Type XXXXIII	42	900	210	1000
- Type XXXXIV	43	900	210	1000
- Type XXXXV	44	900	210	1000
- Type XXXXVI	45	900	210	1000
- Type XXXXVII	46	900	210	1000
- Type XXXXVIII	47	900	210	1000
- Type XXXXIX	48	900	210	1000
- Type XXXXX	49	900	210	1000
- Type XXXXXI	50	900	210	1000
- Type XXXXXII	51	900	210	1000
- Type XXXXXIII	52	900	210	1000
- Type XXXXXIV	53	900	210	1000
- Type XXXXXV	54	900	210	1000
- Type XXXXXVI	55	900	210	1000
- Type XXXXXVII	56	900	210	1000
- Type XXXXXVIII	57	900	210	1000
- Type XXXXXIX	58	900	210	1000
- Type XXXXXX	59	900	210	1000
- Type XXXXXXI	60	900	210	1000
- Type XXXXX XII	61	900	210	1000
- Type XXXXX XIII	62	900	210	1000
- Type XXXXX XIV	63	900	210	1000
- Type XXXXX XV	64	900	210	1000
- Type XXXXX XVI	65	900	210	1000
- Type XXXXX XVII	66	900	210	1000
- Type XXXXX XVIII	67	900	210	1000
- Type XXXXX XIX	68	900	210	1000
- Type XXXXX XX	69	900	210	1000
- Type XXXXX XXI	70	900	210	1000
- Type XXXXX XXII	71	900	210	1000
- Type XXXXX XXIII	72	900	210	1000
- Type XXXXX XXIV	73	900	210	1000
- Type XXXXX XXV	74	900	210	1000
- Type XXXXX XXVI	75	900	210	1000
- Type XXXXX XXVII	76	900	210	100

TABLE 2

**TABLA DE TIROS DE CEMENTO<sub>1</sub>C28<sub>1</sub>F049**

Year	Estimación	Recuperación de base (%)				
		Clasificación	Recurso estimado de base	Recurso estimado de base	Recurso estimado de base	Recurso estimado de base
1	Estimación	100	100	100	100	100
2	Estimación	100	100	100	100	100
3	Estimación	100	100	100	100	100
4	Estimación	100	100	100	100	100
5	Estimación	100	100	100	100	100
6	Estimación	100	100	100	100	100
7	Estimación	100	100	100	100	100
8	Estimación	100	100	100	100	100
9	Estimación	100	100	100	100	100
10	Estimación	100	100	100	100	100
11	Estimación	100	100	100	100	100
12	Estimación	100	100	100	100	100
13	Estimación	100	100	100	100	100
14	Estimación	100	100	100	100	100
15	Estimación	100	100	100	100	100
16	Estimación	100	100	100	100	100
17	Estimación	100	100	100	100	100
18	Estimación	100	100	100	100	100
19	Estimación	100	100	100	100	100
20	Estimación	100	100	100	100	100
21	Estimación	100	100	100	100	100
22	Estimación	100	100	100	100	100
23	Estimación	100	100	100	100	100
24	Estimación	100	100	100	100	100
25	Estimación	100	100	100	100	100
26	Estimación	100	100	100	100	100
27	Estimación	100	100	100	100	100
28	Estimación	100	100	100	100	100
29	Estimación	100	100	100	100	100
30	Estimación	100	100	100	100	100
31	Estimación	100	100	100	100	100
32	Estimación	100	100	100	100	100
33	Estimación	100	100	100	100	100
34	Estimación	100	100	100	100	100
35	Estimación	100	100	100	100	100
36	Estimación	100	100	100	100	100
37	Estimación	100	100	100	100	100
38	Estimación	100	100	100	100	100
39	Estimación	100	100	100	100	100
40	Estimación	100	100	100	100	100
41	Estimación	100	100	100	100	100
42	Estimación	100	100	100	100	100
43	Estimación	100	100	100	100	100
44	Estimación	100	100	100	100	100
45	Estimación	100	100	100	100	100
46	Estimación	100	100	100	100	100
47	Estimación	100	100	100	100	100
48	Estimación	100	100	100	100	100
49	Estimación	100	100	100	100	100
50	Estimación	100	100	100	100	100
51	Estimación	100	100	100	100	100
52	Estimación	100	100	100	100	100
53	Estimación	100	100	100	100	100
54	Estimación	100	100	100	100	100
55	Estimación	100	100	100	100	100
56	Estimación	100	100	100	100	100
57	Estimación	100	100	100	100	100
58	Estimación	100	100	100	100	100
59	Estimación	100	100	100	100	100
60	Estimación	100	100	100	100	100
61	Estimación	100	100	100	100	100
62	Estimación	100	100	100	100	100
63	Estimación	100	100	100	100	100
64	Estimación	100	100	100	100	100
65	Estimación	100	100	100	100	100
66	Estimación	100	100	100	100	100
67	Estimación	100	100	100	100	100
68	Estimación	100	100	100	100	100
69	Estimación	100	100	100	100	100
70	Estimación	100	100	100	100	100
71	Estimación	100	100	100	100	100
72	Estimación	100	100	100	100	100
73	Estimación	100	100	100	100	100
74	Estimación	100	100	100	100	100
75	Estimación	100	100	100	100	100
76	Estimación	100	100	100	100	100
77	Estimación	100	100	100	100	100
78	Estimación	100	100	100	100	100
79	Estimación	100	100	100	100	100
80	Estimación	100	100	100	100	100
81	Estimación	100	100	100	100	100
82	Estimación	100	100	100	100	100
83	Estimación	100	100	100	100	100
84	Estimación	100	100	100	100	100
85	Estimación	100	100	100	100	100
86	Estimación	100	100	100	100	100
87	Estimación	100	100	100	100	100
88	Estimación	100	100	100	100	100
89	Estimación	100	100	100	100	100
90	Estimación	100	100	100	100	100
91	Estimación	100	100	100	100	100
92	Estimación	100	100	100	100	100
93	Estimación	100	100	100	100	100
94	Estimación	100	100	100	100	100
95	Estimación	100	100	100	100	100
96	Estimación	100	100	100	100	100
97	Estimación	100	100	100	100	100
98	Estimación	100	100	100	100	100
99	Estimación	100	100	100	100	100
100	Estimación	100	100	100	100	100

[illegible]

Table 4

**Nomenclatura Química del Cemento: Nombres, Fórmulas y Abreviaturas**

Nombre Químico (Nomenclatura según IUPAC)	Nombre común según Química Cemento	Fórmula Química	Abreviatura utilizada en este trabajo
<b>(A).- En los cementos :</b>			
- Dióxido de Silicio	"Sílice"	$\text{SiO}_2$	S
- Óxido de Aluminio	"Alúmina"	$\text{Al}_2\text{O}_3$	A
- Óxido de Hierro	"Hierro"ú "Óxido Férrico"	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	F
- Óxido de Calcio	"Cal"	$\text{CaO}$	C
- Óxido de Magnesio	"Magnesia"	$\text{MgO}$	Mg
- Trióxido de Azufre	Anhídrido Sulfúrico	$\text{SO}_3$	S ó s
- Óxido de Sodio	"Alcali"	$\text{Na}_2\text{O}$	Na
- Óxido de Potasio	"Alcali"	$\text{K}_2\text{O}$	K
- Agua	"Humedad"	$\text{H}_2\text{O}$	H
- Dióxido de Carbono	Anhídrido Carbónico	$\text{CO}_2$	C
<b>(B).- En las Adiciones Activas :</b>			
- Dióxido de Silicio Reactivo	"Sílice Reactiva"	$\text{SiO}_2^{\text{a-}}$	
- Óxido de Aluminio Reactivo	"Alúmina Reactiva"	$\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{a-}}$	
- Óxido de Hierro Reactivo	"Hierro Reactivo"	$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{a-}}$	
- Dióxido de Silicio Activo	"Sílice Activa"	$\text{SiO}_2^{\text{a+}}$	
- Óxido de Aluminio Activo	"Alúmina Activa"	$\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{a+}}$	
- Óxido de Hierro Activo	"Hierro Activo"	$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{a+}}$	

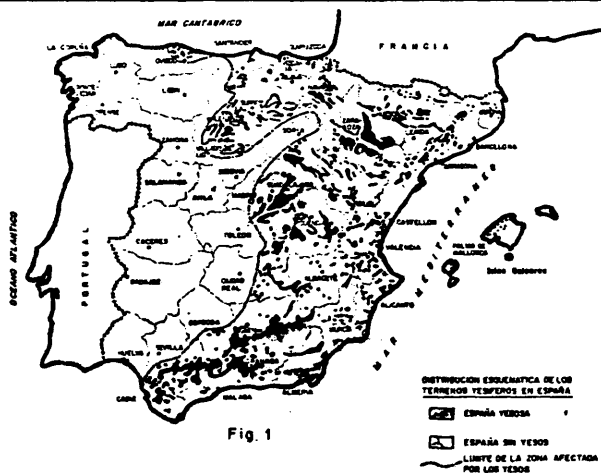


Tabla 5

Nomenclatura Química del Cemento con Adiciones: Pozolanas, Compuestos Mineralógicos Anhidros e Hidratados.

Nombre Mineralógico Común	Fórmula Química	Abreviatura	Material en que se encuentra:
PUZOLANA D		D	
PUZOLANA N		N	
PUZOLANA O		O	
PUZOLANA A		A	
PUZOLANA C		C	
PUZOLANA M		M	
PUZOLANA CV-10		CV-10	
PUZOLANA CV-19		CV-19	
ANHIDRITA	$\text{CaSO}_4$	An	Y
ARAGONITO	$\text{CO}_2\text{Ca}$	Cg	
ARTINITA	$2 \frac{\text{MgCO}_3(\text{OH})}{\text{Ca}_2\text{Mg}_2\text{Fe}_2\text{Al}}(\text{Si AL})_2\text{O}_3$	Ar	Puzolana C
AUGITA	$8 \frac{\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}}{\text{Mg}(\text{OH})_2}$	Au	C
BASSANITA BAJA SINT.	$\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Bs	
BRUCITA	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Br	
CAL (Óxido de Calcio) LIBRE	$\text{CaO}$	C	Cementos
CALCITA	$\text{CO}_2\text{Ca}$	Cc	
CRISTOBALITA (de baja t°, 800°-900°C)	$\text{SiO}_2$	Cr	
DIATOMITA	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Di	
DIOPSIDO	$4 \frac{\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2}{\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2}$	Di	
DOLOMITA	$[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$	Do	
SIN NOMBRE, S.N.	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$	W	O-A
S.N.	$5 \text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	A	A
ENSTATITA	$16 \frac{\text{MgSiO}_3}{\text{MgFe}_2\text{SiO}_3}$	E	O
ENSTATITA FERROAN	$16 \frac{\text{MgFe}_2\text{SiO}_3}{\text{Ca}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}}$	Ef	O
ETTRINGITA	$\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Ett	
" DE RAPIDA FORMACION	"	Ett-rf	
" LENTA "	"	Ett-lf	
" TOTAL	"	Ett-T	
FORSTERITA	$4 \frac{\text{Mg}_2\text{SiO}_4}{\text{Mg}_2\text{O} \cdot 6\text{FeO} \cdot 2\text{SiO}_4}$	Fr	O-A
FORSTERITA FERROAN	$4 \frac{\text{Mg}_2\text{O} \cdot 6\text{FeO} \cdot 2\text{SiO}_4}{\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Al},\text{Si})_2\text{O}_7}$		O
GEHLENITA	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Al},\text{Si})_2\text{O}_7$	G	
S.N.	$\text{Na}_2\text{MgSiO}_4$		A
HEDENBERGITA MAGNÉSICA	$4 \frac{\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})(\text{SiO}_3)_2}{2(\text{Fe},\text{O})}$	Hd	A
HEMATITE	$2(\text{Fe},\text{O})$	H	CV-10
HIDROXIDO DE CALCIO	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	CH	
S.N.	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \text{ (I)}$		C
S.N.	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \text{ (II)}$		C
ILLITA	$[(\text{H},\text{O},\text{K})_2\text{Al}_2(\text{Si},\text{Al})_{16}\text{O}_{40}(\text{OH})_8]$	I	KH
KAOLINITA	$2 \frac{[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]}{y-\text{Fe}_2\text{O}_3}$	K	KH
MAGNÉSITA (SINTÉTICA)	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$	Ma	CV-10, CV-19
MERWINITA (SINTÉTICA)	$\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$	Mw	
MAYENITA (SINTÉTICA)	$\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$	My	
MULLITA (SINTÉTICA)	$n \frac{[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]}{4 \frac{[\text{K},\text{Al},\text{Si}]_2\text{O}_{10}(\text{OH})_{12}}{\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}}}$	Ml	CV-10, CV-19
MUSCOVITA	$4 \frac{[\text{K},\text{Al},\text{Si}]_2\text{O}_{10}(\text{OH})_{12}}{\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}}$	Mv	KH
OPALO	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	O	OH
PERICLASA	$\text{MgO}$	Pr	
PIGEONITA	$16 \frac{[\text{CaO}, 2\text{FeO}, 0.76\text{MgO}, 0.52\text{FeO}, 0.48\text{SiO}_2]}{\text{Ca}(\text{OH})_2}$	Pi	O
PORTLANDITA	$\text{Ca}(\text{OH})_2$		
CUARZO	$\text{SiO}_2$	Q	O, A, M, CV-10, CV-19
RUTILO	$\text{TiO}_2$	Ru	
STISHOVITA	$(\text{SiO}_2)_n$	St	A
TRIDIMITA	$\text{SiO}_2$	Tr	
YESO	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Y	

\* VER TABLADONDE SE EXPONEN LOS MATERIALES UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO

- 3 -  
Tabla 5

1.- Cemento Portland con Adiciones Activas "de Laboratorio" (preparado laboratorio)	PA
2.- Cemento Pozolánico "de Laboratorio" (preparado en el laboratorio)	PUZ
3.- Cemento Pozolánico "Industrial" (adquirido al azar en el mercado nacional del cemento)	PUZ
4.- Cemento Portland de Alto Horno	PHA (2)
5.- Cemento Sobresulfatado	SS (2)
6.- Adición Hidráulicamente Activa ó Adición Activa	AA
7.- Adición Inerte	AI
8.- Resistencia al Ataque de los Iones Sulfato ó Resistencia Sulfática	RS
9.- Velocidad de Formación	VF
10.- Incremento de Diámetro	$\Delta d \dots (\%)$
11.- Velocidad de Incremento de Diámetro, $\left( \frac{\Delta d_{\text{edad } n^{\circ}+1} - \Delta d_{\text{edad } n^{\circ}}}{(\text{edad } n^{\circ}+1) - (\text{edad } n^{\circ}) - n_{\text{días}}} \right)$	$V_{\Delta d} \dots \left( \frac{\Delta d}{d_{\text{f}} \text{ día}} \right)$
12.- Altura	h $\dots \left( \frac{\Delta d}{d_{\text{f}}} \right)$
13.- Penetración Aguja de Vicat	PAV mm (máx. 40)
14.- Incremento de Longitud (valor medio de 5 probetas, concordantes)	$\Delta L \dots (\%)$
15.- Velocidad de Crecimiento Longitudinal, $\left( \frac{\Delta L_{\text{edad } n^{\circ}+1} - \Delta L_{\text{edad } n^{\circ}}}{(\text{edad } n^{\circ}+1) - (\text{edad } n^{\circ}) - n_{\text{días}}} \right)$	$V_{\Delta L} \dots \left( \frac{\Delta L}{d_{\text{f}}} \right)$
16.- Relación agua/cemento	$\frac{a}{c}$
17.- Resistencia Mecánica a Flexotracción (valor medio de $n_p$ probetas, según edades)	$R_{MF} (Kp/cm^2)$
18.- Resistencia Mecánica a Compresión (valor medio de $n_p$ probetas, " " )	$R_{MC} (Kp/cm^2)$
19.- Resistencia Mecánica a Tracción	$R_{MT} (Kp/cm^2)$
20.- Incremento de Resistencias Mecánicas a Flexotracción	$\Delta R_{MF} (\%)$
21.- Incremento de Resistencias Mecánicas a Compresión	$\Delta R_{MC} (\%)$
22.- Velocidad de crecimiento de las Resistencias Mecánicas a Flexotracción	$V_{\Delta R_{MF}} \left( \frac{\Delta R_{MF} (\%)}{d_{\text{f}} \text{ día}} \right)$
23.- Velocidad de crecimiento de las Resistencias Mecánicas a Compresión	$V_{\Delta R_{MC}} \left( \frac{\Delta R_{MC} (\%)}{d_{\text{f}} \text{ día}} \right)$
24.- Porosidad	Poros $(\%)$ día
25.- Velocidad de Ultrasonido	$V_u \dots \left( \frac{mm}{\mu s} \right)$
26.- Incremento de Velocidad de Ultrasonido	$\Delta V_u (\%)$
27.- Velocidad de crecimiento del Incremento de $V_u$	$V_{\Delta V_u} = \left( \frac{\Delta V_u (\%)}{d_{\text{f}} \text{ día}} \right)$
28.- Cantidad de iones sulfato en los líquidos de conservación de las probetas de $1 \times 1 \times 6 \text{ cm}$	$SO_4^{2-} \dots \left( \frac{SO_4^{2-} \text{ lcp, edad } n^{\circ}+1 - SO_4^{2-} \text{ lcp, edad } n^{\circ}}{(\text{edad } n^{\circ}+1) - (\text{edad } n^{\circ}) - n_{\text{días}}} \right)$
29.- Velocidad de variación del contenido de $SO_4^{2-}$	$V_{SO_4^{2-}} \dots \left( \frac{SO_4^{2-} \text{ lcp, edad } n^{\circ}+1 - SO_4^{2-} \text{ lcp, edad } n^{\circ}}{(\text{edad } n^{\circ}+1) - (\text{edad } n^{\circ}) - n_{\text{días}}} \right)$
30.- Agua de amasado "d" ó relación $\frac{a}{c} = c \neq \text{constante}$ (obtenida mediante el método de la "mesa de sacudidas" ó a "escurrimiento" ("flow") = constante), $d > 194 \text{ ml}$	$\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.} \text{ ó } \frac{a}{c} = d \text{ ó } d$
31.- Agua de amasado "c" ó relación $\frac{a}{c} = c = \text{constante} = 194 \text{ ml para } 1500 \text{ g de mortero}$	$\frac{a}{c} = c = \text{cte.} \text{ ó } \frac{a}{c} = c \text{ ó } c$
32.- Comportamiento como un INERTE desde el punto de vista de la RS	INERTE <sub>RS</sub>
33.- Comportamiento como un INERTE desde el punto de vista de la RM	INERTE <sub>RM</sub>
34.- Resistencia Sulfática Elevada (ó de elevada resistencia sulfática)	RS <sub>E</sub>
35.- Resistencia Sulfática Moderada	RS <sub>M</sub>
36.- Resistencia Sulfática Baja o Escasa (ó de baja resistencia sulfática)	RS <sub>B</sub>
37.- Acción Sinérgica en Resistencia Sulfática	Sinérgico <sub>RS</sub>
38.- Acción Sinérgica en Resistencias Mecánicas	Sinérgico <sub>RM</sub>
39.- Incremento de Longitud ó cualquier otro parámetro a 28 d. ó "x" días	$\Delta L_{28 \text{ días}}$
40.- Incremento de Longitud ó cualquier otro parámetro desde una edad del ensayo (7 d.) a otra (28 d.)	$\Delta L_{7-28 \text{ d}}$
41.- Solución Sólida	SS
42.- Penetración Total $> 40 \text{ mm}$	PT
43.- Superficie Específica	Supf. espf. $(cm^2/g)$
44.- Conclusión(es) General(es)	CG
45.- Análisis Químico	AQ
46.- Microscopia Óptica	MO
47.- Microscopia Electrónica	ME
48.- Difracción de Rayos X	CRX
49.- Espectrometría Infrarroja	IR
50.- Temperatura ( $^{\circ}C$ )	T
51.- Análisis Térmico Diferencial	ATD
52.- Análisis Termo Gravimétrico	TGA
53.- Análisis Termogravimétrico Expandido	TGA <sub>exp</sub>
54.- Análisis Derivatométrico	DTG
55.- Método acelerado de ensayo de Le Chatelier-Anstett	L-A
56.- Método acelerado de ensayo HIBRIDO-1	H-1
57.- Resonancia Magnética Nuclear	RMN

diente P o PY solo, que significa que el cemento de mezcla resultante tiene un comportamiento ante dicho ataque peor o inferior al de su P o PY matriz solo, es decir, resiste menos y peor al citado ataque agresivo que dicho cemento P o PY matriz, esto es, que tales cementos P o PY con la puzolana añadida, en sustitución física o mejor suplantación de parte de los mismos, resisten menos y peor el mencionado ataque agresivo, que cuando están solos, o sea, sin la puzolana en cuestión, en cuyo caso se podría decir que la misma no comunica y quizás no posea propiedades "anti-ataque sulfático" o simplemente propiedades "anti-sulfato".

- 4\* - Igualmente a lo largo de todo este trabajo las cantidades porcentuales ponderales de  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  y/o  $C_2F$  que se citen, se referirán a las obtenidas por cálculo, utilizando para ello las fórmulas de Bogue (5) (6); con las cuales se ha obtenido la "Composición Potencial - Bogue" de los cementos portland de elevada resistencia, o no, al ataque de los iones sulfato, empleados en este trabajo. En caso contrario se señalará oportunamente.
- 5\* - Término tecnológico específico "Cal" que normalmente se referirá bien al contenido de  $CaO$  libre o combinado de un clinker de cemento portland, bien a la concentración de  $Ca(OH)_2$  del medio portlandítico medido en mM  $CaO$ /litro.
- 6\* - Del mismo modo a lo largo de este trabajo aparecerá en multitud de ocasiones la expresión científico-tecnológica "Fijar Cal" o "Fijación de Cal" con la cual se debe referir el proceso físico-químico que ocurre entre los componentes hidráulicamente activos o "factores hidráulicos", según Calleja (151),  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$  principalmente, constitutivos de los materiales puzolánicos, y una disolución saturada de hidróxido cálcico - portlandita en la hidratación del cemento portland-, de resultados del cual, se originan compuestos cementantes similares a los que se forman tras la hidratación de los diversos componentes mineralógicos vítreos y/o cristalinos del clinker de cemento portland.
- 7\* - Asimismo a lo largo del presente trabajo aparecerán en numerosas ocasiones los calificativos de cemento portland solo, matriz, base, puro o de origen, aplicados a los cementos portland, P y/o PY, seleccionados para la realización del presente trabajo. Todos ellos significan lo mismo, y es que en tal caso a dicho cemento P o PY no se le ha añadido adición(es) activa(s) alguna(s) estando formado por el clinker portland P o PY correspondiente, más el regulador de fraguado respectivo (yeso hidratado), única y



exclusivamente, de aquí la existencia en algunas ocasiones de la frase "cemento P o PY solo ó al estado puro".

- 8\* - También se ha de hacer constar que a lo largo del presente trabajo se hará referencia general o expresa a los métodos Le Chatelier-Anstett (L-A) (norma holandesa (236)), ASTM C 452-68 (norma USA en desuso, (241), ASTM C 452-75 (Norma USA en vigor (239)) y/o HIBRIDO-1(H-1) (neo-nato), todos ellos métodos acelerados de ensayo para poder calificar a un cemento como de elevada resistencia, o no, al ataque de los iones sulfato. Pues bien, por razones de brevedad expositiva se denominarán, en su caso, y sin más, a lo largo del presente trabajo, método de ensayo L-A, ASTM C 452-68, ASTM C 452-75 e H-1, respectivamente.

Por otra parte e idéntico motivo, cuando se haga referencia expresa a un cemento solo y/o de mezcla PA y/o PZ determinado, para diferenciar que sus probetas y/o muestras respectivas ensayadas, tienen una mezcla conglomerante con un 21,0% ó un 7,0% de  $SO_3$ , se pondrán sus letras y números, en su caso, representativos correspondientes, encerrados, o no, entre paréntesis, respectivamente, es decir, ver Tabla 7

Tabla 7

Ejemplos de notaciones utilizadas en este trabajo

Ejemplos de:		SIGNIFICADO
Cementos o puzolanas solos	Cementos de mezcla	
P-1..., M	P-1/M 70/30	: significa que los mismos se han ensayado según especifica el método ASTM C 452, y/o Fratini selenitoso por lo que su mezcla-conglomerante selenitosa correspondiente tiene un 7,0% de $SO_3$ (= 15,05% yeso)
(P-1)...., (M)	(P-1/M70/30)	: idem, según especifica el método H-1, y/o Fratini selenitoso, por lo que su mezcla-conglomerante selenitosa correspondiente tiene un 21,0% de $SO_3$ (= 45,16% yeso)

- 9\* -A lo largo de la numerosa bibliografía consultada sobre esta temática del comportamiento de estos conglomerantes hidráulicos en medios sulfáticos, se han encontrado, en multitud de ocasiones, los términos "activo" y/o "reactivo" referidos por lo general indistintamente o comunmente, según investigadores, a la parte diversa constitutiva de las puzolanas, distinta de la cristalina, la cual o cuales, junto con esta última, suelen conformarlas en mayor o menor cuantía.

Por ello, aún no siendo objetivo, entre otros, del presente trabajo el definirla(s), precisarla(s) y/o cualificarla(s), en su caso, energética y/o físicamente con exactitud -tema éste de gran interés, cuyo estudio cae dentro de otras especialidades o ramas muy concretas y específicas de las ciencias físico-químicas-, se desea dejar constancia de que pese a no ser partidarios de la común interpretación y/o adscripción de ambos  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , y  $\text{SiO}_2^{\text{a-}}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{a-}}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{a-}}$ , a un mismo concepto y/o estadio de energía y si de lo contrario, vease Tabla 4, a lo largo del presente trabajo, ambos términos se simbolizarán o representarán mediante fórmula común, es decir,  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  respectivamente y todo ello en base a razones de facilidad, comodidad y brevedad expositiva dado que no afecta en nada a los fines y objetivos pretendidos del presente trabajo. (Recientemente S. Moya (295) ha descubierto mediante RMN que la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  está en forma pentacoordinada con el oxígeno).

10ª - Como se verá en su momento, las mezclas porcentuales, en peso, cemento portland, de elevada resistencia, o no, al ataque de los iones sulfato, "X" (clínker de cemento P o PY más regulador de fraguado), más puzolana, "Y", han sido 80%/20%, y/o 70%/30% y/o 60%/40%, tituladas común y genéricamente a lo largo de este trabajo simplemente como 80/20, 70/30 y 60/40, a secas, respectivamente, según objetivos y denominándose a dicha triada sin más "FAMILIA DE CEMENTOS DE MEZCLA PA Y PUZ". Y las razones por las que se eligieron éstas y no otras mezclas puzolánicas fueron las siguientes:

a) Porque este estudio sobre cementos PA y PUZ surgió como consecuencia de la creciente utilización presente y futura en forma de hormigón en masa o armado en grandes obras civiles tales como: diques para presas, pantales para puertos de mar, túneles, grandes cimentaciones y pilotajes, canalizaciones y tuberías diversas, firme de carreteras, etc., en aguas marinas, muy puras, carbónicas, y/o selenitosas, además de en terrenos yesíferos; así como también como cemento de albañilería, extremo éste nada desdeñable quizás en un futuro inmediato.

b) Porque los posibles cementos PA y/o PUZ que a la luz de este trabajo se fabriquen con alguna intencionalidad específica, pudieran cumplir, con relativa comodidad, con las especificaciones, entre otras, más o menos específicas, de resistencias mecánicas vigentes, tanto españolas como europeas y norteamericanas, y ello se consigue fácilmente con las mezclas tradicionalmente más empleadas en la preparación de este tipo de cementos, como son, la 80/20, 70/30 ó 60/40, en peso.

c) Por tratar de confirmar o comprobar el grado de validez de empleo y uso del método de ensayo ASTM C 452-68 a los cementos P y PY, y

y PUZ, españoles, respectivamente, y en caso afirmativo para estos últimos, poder hacerlo extensivo, obviamente por inclusión, a sus "hermanos menores" los cementos normalizados españoles PA correspondientes, en su caso, sin que para ello se tuvieran que hacer muchas variedades de estos últimos. En este caso sólo se ha hecho una, la 80/20.

d) Porque la práctica real ha sancionado y demostrado que la mezcla puzolánica más extrema o cemento puzolánico con mayor contenido, en peso, de puzolana, que cumple generalmente con todas las especificaciones nacionales e internacionales, sea cual fuese la puzolana, suele ser la 60%/40%, o sea, 60/40, aunque sólo alguna(s) de ella(s), deducible como se verá de las conclusiones de este trabajo, proporcione(n) lo especificado al respecto, aún en mayor porcentaje de adición, el 45%, 50%, 55%,... etc. en peso, pero generalmente aquella(s) suele(n) ser caso(s) aislado(s), y por tanto ni general(es), ni común(es).

e) Porque pese a ser la mezcla puzolánica 75/25 otra de las más comúnmente utilizadas en la práctica real, se optaría en cambio por la 80/20 para este trabajo dado que en oposición a lo anterior, d), tal mezcla puzolánica puede considerarse como la mezcla "frontera" que separa a los cementos PA, de los cementos PUZ, de aquí que dicha mezcla puzolánica, en cierta medida, pueda considerarse "común" para ambos tipos de cementos PA y PUZ, por ser,

- la mezcla "más PA" de todas las posibles normalizadas (el último de todos los cementos posibles PA), y a la vez pensar que pueda ser,

- la mezcla "menos PUZ" de todas las posibles, que sin cumplir la normativa, se ha considerado como tal para los fines de este trabajo por no afectarle en nada a los mismos.

Por todo lo cual la citada mezcla puzolánica 80/20 puede ser presentada como:

- ejemplo cierto de cemento PA, sin haber tenido que hacer mezcla más alguna de los mismos para obtener conclusiones sobre ellos, y como

- ejemplo muy aproximado de cemento PUZ.

f) Porque finalmente se hacía necesario incluir una tercera mezcla puzolánica, intermedia de las otras dos antes citadas, 60/40 y 80/20, la cual obviamente habría de recaer en la 70%/30%, o sea 70/30, para ver de este modo si la cadencia de las conclusiones que se obtuvieron guardaban, o no, relación alguna con las cantidades presentes de puzolana añadida.

11<sup>a</sup> - La edad de una probeta se referirá siempre al tiempo de hidratación selenitosa de la misma transcurrido desde el momento inicial que se conserva en el medio apropiado para tal fin, hasta el momento en que por cualquier

motivo y/o circunstancia, prefijados, o no, se le haya de medir uno(s) determinado(s) parámetro(s) a la misma.

Por otra parte, la frase abreviada que aparecerá en muchas ocasiones: "a la edad de X días", se referirá siempre concretamente a esta otra de: "a la edad del ensayo (en cuestión) de X días".

12\* - Cuando se haga referencia expresa al incremento porcentual de un determinado parámetro, ya sea L, Ø, RMF, RMC, etc. se expresará sin más con el signo de incremento Δ delante del símbolo correspondiente a dicho parámetro, quedando implícito que en todos los casos vendrá expresado en tanto por ciento, es decir, %.

13\* - El simbolismo  $\frac{a}{c}$  a secas que aparecerá en ocasiones, se refiere a la "relación agua/cemento", significando en este trabajo el cociente "cemento", la mezcla-conglomerante selenitosa correspondiente P ó PY o PA o PUZ o PUZ más yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), en cantidades suficientes, 7,0% ó 21,0% de  $\text{SO}_3$ , según cada caso estudiado.

14\* - El material YESO que en multitud de ocasiones aparecerá a lo largo de este trabajo, se refiere a la pieza de yeso natural molida (alabastro) convenientemente, cuya fórmula química es  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . La(s) cantidad(es) del mismo presente(s) en cada caso se expresará(n) casi siempre como  $\text{SO}_3$  en %.

15\* - A lo largo de este trabajo aparecerán en ocasiones, las puzolanas seleccionadas para la realización del mismo, ver Tabla nº 11, bien solas o en forma de un cemento de mezcla PA ó PUZ, clasificadas en un orden dado, en función de un parámetro determinado correspondiente a sus probetas respectivas, y con un asterisco, \*, en forma de super-índice, es decir:

- caso a),  $*(O) < (D) < (N) < (A) < (C) < (M)$ , o
- caso b),  $(D) < (N) < (C) < (O) < (A) \approx (M)^*$ , o
- caso c),  $(D) < (N)^* < (O) < (C) < (A) < (M)$ .

Pues bien, ello significa:

- en el caso a), que el valor del parámetro de que se trate de las probetas correspondientes al cemento de mezcla preparado con dicha puzolana O, es mayor que el de las probetas del cemento matriz acompañante correspondiente P ó PY solo, (en este caso se trata del (P-1), comparado con el cemento de mezcla (P-1/O 60/40), mediante el parámetro  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respectivas de mortero 1:2,75 de mezcla-conglomerante selenitosa con 21,0% de  $\text{SO}_3$ ); luego según ello, en este caso la clasificación expuesta corresponde en realidad a esta otra,

$$\bar{\Delta}L (P-1) < \bar{\Delta}L (P-1/O 60/40) < \bar{\Delta}L (P-1/D 60/40) < \bar{\Delta}L (P-1/N 60/40) < \bar{\Delta}L (P-1/C 60/40) < \bar{\Delta}L (P-1/M 60/40)$$

- en el caso b) significa todo lo contrario, es decir,

$$\bar{\Delta}L(P-1/D\ 60/40) < \bar{\Delta}L(P-1/N\ 60/40) < \bar{\Delta}L(P-1/C\ 60/40) < \bar{\Delta}L(P-1/O\ 60/40) = \\ = \bar{\Delta}L(P-1/A\ 60/40) = \bar{\Delta}L(P-1/M\ 60/40) < \bar{\Delta}L(P-1)$$

- y en el caso c), que el valor del parámetro en cuestión de las probetas del cemento matriz acompañante P-1 solo, se encuentra situado entre los valores correspondientes a las probetas de cada uno de los cementos de mezcla preparados con cada puzolana adyacente, con asterisco a derecha e izquierda respectivamente, es decir

$$\bar{\Delta}L(P-1/D\ 60/40) < \bar{\Delta}L(P-1/N\ 60/40) < \bar{\Delta}L(P-1) < \bar{\Delta}L(P-1/O\ 60/40) < \bar{\Delta}L(P-1/C\ 60/40) < \\ < \bar{\Delta}L(P-1/A\ 60/40) < \bar{\Delta}L(P-1/M\ 60/40)$$

Pero además, para evitar la repetición del símbolo del parámetro correspondiente, se podrán clasificar del siguiente modo, ver Tabla 8.

Tabla 8

Parámetro resistente a: $\bar{\Delta}L$ y orden de clasificación	Clasificación correspondiente, que para estos ejemplos citados sería respectivamente:	Relación de tiempo entre los ensayos
$< \bar{\Delta}L >$	$(P-1 < P-1/D\ 60/40) < (P-1/D\ 60/40) < (P-1/N\ 60/40) < (P-1/C\ 60/40) < (P-1/O\ 60/40) < (P-1/A\ 60/40) < (P-1/M\ 60/40) < (P-1)$	120
de menor a mayor, que es el caso de estos ejemplos:	$(P-1/D\ 60/40) < (P-1/N\ 60/40) < (P-1/C\ 60/40) < (P-1/O\ 60/40) < (P-1/A\ 60/40) < (P-1/M\ 60/40) < (P-1)$	de menor a mayor
de mayor a menor, en caso distinto, $> \bar{\Delta}L >$	$(P-1/D\ 60/40) < (P-1/N\ 60/40) < (P-1/C\ 60/40) < (P-1/O\ 60/40) < (P-1/A\ 60/40) < (P-1/M\ 60/40) < (P-1)$	de mayor a menor

16\* - Como es sabido, la tobermorita se puede presentar cristalina o en forma de gel, pudiendo ser distinto su origen, -bien de la hidratación portlandítica de la  $SiO_2^{r-}$  de una puzolana, o bien de la hidratación del  $C_3S$  y/o  $C_2S$  de un cemento portland-, y relación C/S. Generalmente la primera o de origen puzolana, se suele originar en forma de gel.

De aquí que en el caso de poderse formar ambas en la hidratación del cemento de mezcla PA y/o PUZ, a lo largo del presente trabajo y para diferenciarlas, se denominará a la primera o de origen puzolana, gel(es) tobermorítico(s) diversos (por poder ser distinta la relación C/S), de neoformación y origen  $SiO_2^{r-}$  de la puzolana X, o simplemente gel(es) de  $CSH_{SiO_2}^{r-}$  de la puzolana X.

- 17<sup>a</sup> - A lo largo del presente trabajo, se encontrará en numerosas ocasiones expresiones similares a la siguiente:

Puzolana	P-n <sup>a</sup> y/o PY-n <sup>a</sup> /Puzolana X; 100/00 ó 80/20 ó 70/30 ó 60/40
	que significa :
	P-n <sup>a</sup> y/o PY-n <sup>a</sup> ó P-n <sup>a</sup> y/o PY-n <sup>a</sup> /Puzolana X 80/20 ó P-n <sup>a</sup> y/o PY-n <sup>a</sup> /Puzolana X 70/30 ó P-n <sup>a</sup> y/o PY-n <sup>a</sup> /Puzolana X 60/40

- 18<sup>a</sup> - En el presente trabajo aparecerá en ocasiones la frase: "La puzolana X se ha portado mejor que la Y...." y otras similares. Pues bien, la misma se refiere a que por lo general, a igualdad de edad, cemento de mezcla, cemento portland matriz constitutivo y relación  $\frac{a}{c}$ , en su caso, la puzolana X ha aumentado la RS o RH de dicho cemento portland matriz P o PY solo , mientras que la Y las ha aumentado menos o incluso disminuido.
- 19<sup>a</sup> - Igualmente se encontrará a veces la frase "finura de un cemento y/o puzolana, etc.", que se refiere al tamaño de sus partículas y se expresa,
- bien mediante el grado de finura de molido del mismo, determinable mediante un tamiz de luz de malla dado, o
  - bien mediante la superficie específica,  $\text{cm}^2/\text{g}$ , determinable mediante el permeabilímetro Blaine.
- 20<sup>a</sup> - En el presente trabajo se entenderá por,
- edades iniciales del ensayo, las comprendidas entre 1 ó 7, y 28 ó 60 días,
  - edades intermedias del ensayo, las comprendidas entre 90 y 270 días, y
  - edades finales, del ensayo, las comprendidas entre 270 y 730 días de edad de las tortas o probetas correspondientes.
- 21<sup>a</sup> - En el presente trabajo se entenderá por:
- $\bar{\Delta L}_{7d}$  ó cualquier otro parámetro = valor del  $\bar{\Delta L}$  a la edad de 7 días,
  - $\bar{\Delta L}_{7-28d}$  ó cualquier otro parámetro = valor del  $\bar{\Delta L}$  desde la edad de 7 a la de 28 días,
  - $\bar{\Delta L}_{i-jd}$  ó cualquier otro parámetro = valor del  $\bar{\Delta L}$  desde la edad de i a la de j días,

- y así sucesivamente.

- elevado contenido de  $C_3A$ , áquel cuyo contenido esté comprendido entre el 15,0% y el 8,0%,

- escaso a prácticamente nulo contenido de  $C_3A$ , áquel cuyo contenido esté comprendido entre 3,0% y 0,0%.

cuyo significado es obvio.

Igualmente cuando aparezca,

A B ..... significará que se ha invertido el orden de la mayoría

"fijar  $\text{SO}_3$ ...", que equivale a "fijar ión  $\text{SO}_4^{=}$  en forma de yeso y expresado como  $\text{SO}_3$ ",

"fijación de  $\text{SO}_3^{2-}$ ...", que equivale a "fijación de ión  $\text{SO}_4^{2-}$  en forma de yeso y expresado como  $\text{SO}_3$ ",

"consumo de  $\text{SO}_3$  ...", que equivale a "consumo de ión  $\text{SO}_4^{--}$  en forma de yeso y expresado como  $\text{SO}_3$ ",  
"cantidad de  $\text{SO}_3$  ...", que equivale a "cantidad de ión  $\text{SO}_4^{--}$  en forma de yeso y expresado como  $\text{SO}_3$ ",  
"contenido de  $\text{SO}_3$  ...", que equivale a "contenido de ión  $\text{SO}_4^{--}$  en forma de yeso y expresado como  $\text{SO}_3$ ", y  
otras mas o menos similares en las que aparezca  $\text{SO}_3$ , las cuales se habrán de interpretar siempre en el sentido citado anterior y no como que el presente trabajo se haya empleado y manejado el Trióxido de Azufre como tal.

26ª - En algunos gráficos de DRX aparece la letra A sola, corresponde a Aluminio metal del portamuestras utilizado.

27ª - A lo largo del presente trabajo y en algunas ocasiones, aparecerá la denominación siguiente: "la  $\text{SO}_4^{--}$  lcp", que significa "la cantidad de iones sulfato del líquido de conservación de las probetas".

28ª - En todas las Interpretaciones de este trabajo aparecerá comúnmente la frase "...como ha ocurrido en este trabajo" ó "como así ha ocurrido en este trabajo" ó "...que ha sido lo ocurrido en este trabajo", al final de los párrafos ó hipótesis explicativas de la causa real o posible de lo acontecido. Pues bien, dichas frases terminales no se refieren a que tales hipótesis explicativas tengan que ser siempre necesariamente las verdaderas en todos los casos, sino que a tenor de las técnicas operatorias manejadas y sus limitaciones, en unos casos han resultado ser claramente evidentes y acertadas -sobre todo aquellos que confirman los Fundamentos Principales o mejor las Hipótesis de trabajo de la labor realizada- mientras que en otros puede, quizás, que no lo hayan sido tanto. Con lo que en estos últimos especialmente tales frases terminales citadas se refieren lógicamente mas al hecho ocurrido en sí que a su(s) hipótesis explicativa(s).

29ª - En todos los pasajes en los que aparezca de algun modo la frase: "Los cementos Portland con adición de materias puzolánicas únicamente hasta un 40% en peso...", o cualquier otro similar en significado, ha de quedar implícita esta otra adicional a la misma que por razones de brevedad y no repetición se ha omitido: "... Y QUE SE PREPAREN EN FABRICA SEGUN ESPECIFICACIONES EXPRESAMENTE EL PLIEGO RC-75 (1) PARA LOS ACTUALES CEMENTOS PA Y PUZ ESPAÑOLES, ENTRE OTROS".

30ª - Aquellas anotaciones o páginas completas realizadas con letra pequeña son de igual importancia o grado de interés que el resto de las páginas realizadas con el presente tamaño de letra.

31ª - Donde diga escuetamente "ACCION SINERGICA MAXIMA o ADECUADA", o frase similar en contenido pero distinta en composición, querrá decir, "ACCION SINERGICA EXPRESIVA MAXIMA o ADECUADA".



## II.- PROLOGO

## II.- PROLOGO

En la corteza terrestre existen grandes extensiones de terrenos y suelos que contienen cantidades considerables de sulfatos minerales, especialmente de calcio (yeso), magnesio (epsomita), sodio (tenardita), sodio y calcio (mirabilita o glauberita), potasio, etc., y entre estos últimos, algunos que contienen el 5% o más de yeso y cantidades apreciables de otros sulfatos; así podríamos citar determinados lugares de España, Rusia, Gran Bretaña, Estados Unidos de Norteamérica -donde se encuentran los llamados aguas (7) (8) y suelos (9) "alcalinos"-, Canadá, Francia, Norte de Africa, Oriente Medio y otros.

En cada uno de ellos existe por lo general, entre los distintos tipos de sulfatos citados, uno o más predominantes, encontrándose los restantes en porcentajes menores. La naturaleza, eminentemente yesífera, de los suelos de la Península Ibérica, así como el desarrollo de sus costas, como se puede apreciar en el plano realizado por el Servicio Geológico de Obras Públicas, Fig. 1, y los datos aportados al respecto por el Dr. García Yagüe, según el cual si contabilizamos sólo la superficie donde se encuentra yeso de primera formación, resultaría que en España cerca del 10% del territorio tiene yeso y que más de once provincias lo tienen en cantidades superiores al 10% de su superficie, colocan a los sulfatos en general y al yeso en particular, como uno de los factores más destructores del hormigón.

El agua de lluvia caída sobre todos estos terrenos sulfáticos realiza dos misiones sucesivas: el lavado de los mismos y la solubilización gradual de los sulfatos anejos a ellos; de tal manera que, después, estas aguas llevan en disolución, entre otras, una cantidad de ión sulfato, que varía de unos lugares a otros, según sus distintas características.

De antiguo es conocida la susceptibilidad del hormigón en las estructuras sometidas al ataque de suelos y aguas sulfatadas como ya probó Smeaton en 1756 (10) y posteriormente se ha puesto de manifiesto en numerosos casos entre los que cabe citar, en Europa: el puerto de Hamburgo, los canales de la zona del río Ems, y en Norteamérica: en los Estados Unidos se da cuenta de daños en el alcantarillado, en tubos empleados para el drenaje del campo, en cimentaciones, etc.

Y volviendo a Europa y centrándonos en España, podemos citar: el canal de Lodosa (1935), la presa de Allos (río Salado) (1930-1960), el Puente de Praga (Madrid) (1955 al 63), canalizaciones y túneles de riego en las

provincias de Salamanca y Zaragoza, etc., demolición de determinados edificios en Mataró, etc., etc., (11).

Todo este tipo de daños y muy particularmente los ocurridos en nuestro suelo, harían que en el año 1951 se crease en el otrora Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento del extinto Patronato "Juan de la Cierva" del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), una línea de trabajo, a cuyo frente figuró D. Pablo García de Paredes y Gaibrois, para estudiar en profundidad y con detalle todos estos problemas, a fin de evitar en lo posible sus fatales consecuencias. Dicha línea de trabajo, siempre en progresión continua, daría lugar en nuestro país primeramente en 1962 al I Coloquio Internacional sobre Obras Públicas en los Terrenos Yesíferos (12) y posteriormente en 1973, a las 1<sup>as</sup> Jornadas de Durabilidad (13).

Por otra parte, la necesidad imperiosa de que los hormigones con que se realizan esas obras sean estables a lo largo del tiempo, dió origen igualmente, a que en cada país se crearan distintas Comisiones y/o Centros de Investigación dedicados al estudio y posterior resolución de estos problemas, dando lugar todo ello a la creación de un amplio campo de investigación a nivel mundial que se conoce como "DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES".

Un hormigón es "DURABLE" cuando resiste, en grado satisfactorio, los efectos de las condiciones del entorno a los que ha sido expuesto, tales, entre otros, como el desgaste, y las condiciones atmosféricas y fisico-químicas. La condición que siempre se exige a las construcciones independientemente de su importancia, es que cumplan el cometido al cual se las destina durante un período de tiempo dado. Esta condición lleva implícita la inalterabilidad de las cualidades o por lo menos la limitada variación de ellas frente a las condiciones ambientales de servicio. Y precisamente esa "permanencia en el tiempo" constituye la cualidad de "DURABLE".

Todas las obras, estructurales y elementos estructurales de hormigón, imponen, en función de sus particularidades intrínsecas -propiedades características-, y extrínsecas -funcionalidad y continuidad de servicio en las circunstancias ambientales de cada caso-, una serie de condiciones al material hormigón ya sea en masa, armado o pretensado. Estas condiciones se refieren fundamentalmente a tres parámetros: Resistencia Mecánica, Estabilidad de Volumen y Resistencia Química. El conjunto de las tres constituye lo que, en términos generales y amplios, se puede llamar "DURABILIDAD" de la obra, esto es, su permanencia en servicio a lo largo del tiempo, con la garantía de un margen de seguridad suficientemente amplio, en todo momento, y en todas circunstancias reales previsibles en dicho servicio.

Para conseguir la calidad y el comportamiento óptimo de las obras y con ello la máxima durabilidad de las mismas, es preciso que los componentes del hormigón, sus proporciones, la tecnología y la durabilidad del material sean los más adecuados (14). De este modo se podría definir que la "DURABILIDAD" de un material, o una construcción, es el conjunto de cualidades que aseguran la casi inalterabilidad de sus características durante su vida "útil" en las condiciones de su ambiente de trabajo (15). Para estructuras de hormigón que hayan de tener, entre otras, la cualidad de su gran durabilidad en el tiempo, es esencial que, a los factores ambientales que están íntimamente ligados a ella, capaces de efectuar adversamente su vida de servicio, se les de la consideración que merecen.

Los agentes destructores potenciales son numerosos, de aquí que se hayan estudiado durante muchos años (16), e incluyen el fuego y el hielo, el agua del mar y las aguas del terreno, aceites, grasas, gases, disoluciones de sales, ácidos, bases, etc., a los que el hormigón puede estar expuesto en la realidad (17). De todos ellos el ataque químico del hormigón por aguas agresivas es uno de los factores responsables del daño, deterioro y destrucción del mismo, siendo, frecuentemente, la presencia de sulfatos en aquellas, la causa de su comportamiento agresivo para él, ya que ciertos compuestos de la pasta de cemento pueden reaccionar con los sulfatos (18) dando lugar a fenómenos nocivos.

Respecto a dicho ataque se puede decir que tanto los estudios reales, como los de laboratorio llevados a cabo, en otro sentido distinto al presente, han demostrado que la vulnerabilidad de hormigones similares, por ataque sulfático, varía en función del tipo de cemento portland empleado. La causa fundamental de tal vulnerabilidad, es la expansión destructiva asociada al ataque sulfático, motivada a su vez como consecuencia de una serie de reacciones químicas, entre los compuestos mineralógicos del cemento portland hidratado y los iones sulfato, ocurriendo, todas ellas, en el conjunto de la masa, conglomerado y/o pieza de hormigón endurecido.

Así pues toda interacción existente en todos los órdenes de la naturaleza, la podemos semejar a una acción en la que, por etimología, habrán de conferir a la vez, el elemento "atacante" y el "atacado", verificándose, por lo general, el ataque o la interacción entre ambos, por aquellas zonas, partes o lugares del "atacado" más susceptibles a las características conaturales de ataque del "atacante", siendo por lo general para la "familia" de los cementos portland, la fase de aluminatos, y de un modo especial el  $C_3A$ , "atacado", por su mayor susceptibilidad a las características conaturales de ataque del elemento "atacante", el ión sulfato de las aguas agresivas sulfáticas y particularmente yesíferas en el caso español. Así ocurre comúnmente que obras hechas a base de cemento portland, en cuanto entran en contacto con disoluciones de sulfatos, acaban por desintegrarse al cabo de un tiempo dado.

### III.- I N T R O D U C C I O N

### III.- INTRODUCCION

El problema citado en los capítulos anteriores, relacionado con el ataque de los cementos portland por los iones sulfato, se abordó en un principio en los EE.UU tratando de disminuir cuantitativamente el contenido de  $C_3A$  procedente del cemento portland, en el conjunto de la masa del hormigón (5) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28). Para ello parte de áquel se sustituía físicamente, hasta los límites máximos permisibles, por determinados materiales, generalmente inorgánicos, más o menos rocosos y molidos, y de contenido variable en silicatos. A dichos materiales se les designó genéricamente ADICIONES, inertes o activas; a su vez a estas últimas se las denominó de un modo general, con el término PUZOLANAS (de estos materiales se tratará ampliamente más adelante).

En general los resultados que se obtuvieron vinieron a ser tan heterogéneos e inconexos, a veces, como las adiciones empleadas, habiéndolos de todos los gustos y cuantías, de tal modo que comprendían una gama que se extendía desde muy buenos a muy malos, y sobre todo con el natural apelativo genérico del momento de que "esta adición inerte o aquella puzolana..... mejora la resistencia a los sulfatos de tal cemento.... y aquella otra la empeora...."; es decir, sin pretenderlo se había desembocado en la "casuística".

Obviamente la ingeniería civil, campo práctico de utilización de todos estos materiales, no podía hacer recaer su responsabilidad y ejecutoria en la "casualidad...." del buen o mal comportamiento de tal o cual adición con tal o cual cemento portland, dilucidado siempre, en su caso, merced a largas investigaciones previas, no carentes de metodología pragmática, y si por el contrario y como es lógico en la CAUSALIDAD METODOLOGICA del mismo. Por todo lo cual, paralelamente a estas investigaciones y posiblemente por los resultados proporcionados por las mismas, hízose imprescindible y necesario abordar además el problema, estudiando con detenimiento el comportamiento de una gran variedad de cementos portland y más concretamente de sus correspondientes clínkeres, seleccionados por las cantidades respectivas de los componentes fundamentales ("alita", "belita", "celita", "bronwmille rita" y "ferritos", más o menos cristalinos), frente a la acción de los diversos sulfatos.

Fruto de todo ello fue la puesta en marcha de unas investigaciones (7), (8), (9), (29), (30), (31), (32), (33), (34), a veces solapadas en el tiempo con las anteriores, de las que aún se siguen obteniendo resultados en esta última década.

Por otra parte Kalousek, Porter y Benton (35), señalan que las limitaciones normalizadas actualmente sobre los cementos porcentuales potenciales calculados de  $C_3A$  y  $C_4AF + 2 C_3A$  de los cementos portland de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato (tipo V, USA) NO SON LA UNICA Y MEJOR RESPUESTA AL PROBLEMA DEL ATAQUE SULFATICO, ya que según ellos, la esperanza de vida media ante un ataque sulfático, de algunos hormigones de elevada calidad preparados con tales cementos, es de menos de 50 años.

Estos fenómenos están también relacionados con:

- a) las aseveraciones realizadas, mucho antes, por Santarelli (34) y Michaelis (36), en el sentido de que no se puede olvidar la posibilidad de ataque sulfático adicional, aunque más lento, de la fase "ferrítica", cuya composición es variable según la saturación de  $Al_2O_3$  del MF,  $\frac{\% As_2O_3}{\% Fe_2O_3}$ , y su proporción en el clínker.
- b) lo afirmado por Thorvaldson (88) de que las probetas carentes de  $C_3A$ , en las que el  $Al^{3+}$  está, todo él, como  $C_4AF$ , fueron atacadas por disoluciones al 2% de  $Na_2SO_4$  ó  $MgSO_4$ , con una intensidad menor de lo que lo son las probetas de mortero hechas con  $C_3A$  puro, pero mayor que sus homónimas de  $C_3S$  puro, y
- c) lo afirmado por Bogue (5) de que probetas de mortero de cemento con 15% de  $C_4AF$ , permanecieron más de 10 años en disolución de  $Na_2SO_4$ , y no mostraron señal alguna de expansiones (¿Llegarían a los 20 años ... y a los 50 años...?); por el contrario y en contra de lo que cabría esperar, sus homónimas del 24% al 27% de  $C_4AF$ , se destruyeron a los 2 años.

Y es que se ha de reconocer y admitir lo poco estudiados que han sido hasta el momento los sulfato-ferritos de calcio hidratados, al igual que lo han sido en detalle, profundidad, duración y consecuencias tecnológicas por más de 50 años, los sulfato-aluminatos correspondientes.

Por todo lo cual cabe preguntarse:

- 1ª - ¿Y es que los sulfato-ferritos de calcio hidratado pueden llegar a ser, a largo plazo, tan nocivos como sus correspondientes y conocidos sulfato-aluminatos, necesitándose tanto tiempo, casi 50 años o más, para manifestarlo externamente en el mortero u hormigón correspondiente que ya para entonces estará bastante hidratado, fraguado, endurecido y "a propósito" para ello?
- 2ª - Tal posible nocividad tan postrera ¿podría ser debida a los sulfato-ferritos de calcio hidratados o a los sulfato-aluminatos correspondientes de origen  $Al^{3+}$  proveniente del  $C_4AF$ ?

No obstante, y en cualquier caso, pese a reconocerse, como decimos, que también el  $C_4AF$  puede ocasionar expansiones, por ataque sulfático, si bien con mucha menor rapidez que el  $C_3A$ , no existen datos concretos y conclusiones precisas sobre la resistencia a muy largo plazo, más de 50 años, del  $C_4AF$  y/o  $C_2F$  y/o sus posibles soluciones sólidas, bien puros o al estado de combinación entre si o con otros compuestos, en los cementos portland correspondientes. Por lo que todo ello condujo a tener las naturales reservas a la hora de tratar de resolver esta temática "anti-sulfato" o de "lucha contra el ión sulfato" o mejor de "resistencia ante el ataque del ión sulfato", por la vía de aplicar soluciones "féricas" mediante puzolanas, o vía de creación intencionada mediante puzolanas de sulfato-ferritos de calcio hidratados en lugar de los sulfato-aluminatos correspondientes, en sentido similar a como ocurriese años atrás con la resolución de dicho problema existente por entonces para los cementos portland, que como se sabe se llevó a cabo aumentando debidamente el %  $Fe_2O_3$  en detrimento del %  $Al_2O_3$ , en el MF del crudo correspondiente, para de este modo llegar a obtener los cemento "Ferrari" o "Féricos" o "Khül" y similares. Tales reservas han llegado a limitar y centralizar, como se verá en su momento, el estudio y solución de esta temática mediante "algunas puzolanas", objeto éste fundamental del presente trabajo de tesis.

Y volviendo de nuevo a la temática primitiva, se observa que como resultado de los trabajos llevados a cabo por entonces, se obtuvo la primera gran conclusión sobre la misma, circunscrita única y exclusivamente a los cementos portland, y es que "la resistencia potencial de un cemento portland al ataque de los iones sulfato es función inversa, principalmente, de su contenido de  $C_3A$ ". Por cuya razón se hizo patente la gran vulnerabilidad de los cementos portland por el ataque sulfático y la necesidad de disponer de unos nuevos cementos cuyos contenidos respectivos de  $C_3A$  y  $C_4AF$  estuviesen por debajo de unos límites que actualmente ya se encuentran como especificaciones y/o limitaciones diversas en los distintos países con tecnología avanzada.

Tales cementos, calificados genéricamente como "Cementos Portland Resistentes a los Sulfatos", en España pasarían a denominarse, en principio, "Cementos Portland Resistentes a las Aguas Selenitosas o Cementos PAS" (2). En este sentido conviene señalar los trabajos previos realizados al efecto en el IETcc por el Dr. Soria (38). Posteriormente, y a partir de 1975, a tales cementos se les conoce como "Cementos Portland Resistentes al Yeso", P-Y (1).

Estos cementos, clasificados siempre dentro de los Cementos Portland, aunque diferenciados, como se verá, de ellos, se caracterizan en todos los países por tener limitados los contenidos porcentuales ponderales calculados de  $C_3A$  y  $C_4AF$ , solos o en coyunda, siendo para España el máximo del 5% para el primero y el máximo del 22% para la suma de ambos.



#### IV.- GENERALIDADES SOBRE EL ATAQUE DE LOS CEMENTOS POR IONES SULFATO

#### IV.- GENERALIDADES SOBRE EL ATAQUE DE LOS CEMENTOS POR IONES SULFATO

##### IV.1. Causas del mismo: Formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados expansivos.

La interacción entre los cementos portland y los iones sulfato a los que se hace referencia en el Cap. II, por su transcendencia tecnológica y/o científica, ha sido y continúa siendo investigada, a nivel mundial, habiéndose encontrado que, generalmente, por la acción de los iones sulfato sobre los compuestos mineralógicos de hierro y aluminio del cemento portland hidratado, y de un modo especial sobre la fase ferrítica, se forman unos compuestos que según H. Kühn (39) se clasifican en las categorías y tipos siguientes:

- Categoría A: las sales complejas de aluminato tricálcico:

Tipo I:  $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaSO}_4 \cdot 30 \text{ ó } 32 \text{ H}_2\text{O}$  (40) (41), o bien,

$\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{ CaSO}_4 \cdot 30 \text{ ó } 32 \text{ H}_2\text{O}$ , o bien,  $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{30 \text{ ó } 32}$ , o bien,

$\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Cs}_3 \cdot \text{H}_{30 \text{ ó } 32}$

Tipo II:  $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$  (42), o bien

$\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$ , o bien,  $\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{12}$ , o bien,  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Cs} \cdot \text{H}_{12}$

- Categoría B: las sales complejas de ferrito tricálcico:

Tipo I:  $3 \text{ CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaSO}_4 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$  (43) (44)

Tipo II:  $3 \text{ CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$  (45)

Las sales de la Categoría A se denominan "Fase AFt", las del Tipo I, y "Fase AFm" las del Tipo II, según sean tres o una las moléculas de sulfato de calcio que contengan respectivamente. Pese a ello, otros investigadores las denominan también de diferentes maneras, a saber:

a) Para el caso de la primera o Tipo I, o "Fase AFt": "Trisulfoaluminato Tricálcico Hidratado", o "Trisulfoaluminato Hidrato", o "Trisulfoaluminato", o "Trisulfato", o "Trisulfo", o "Sulfoaluminato de Calcio Hidratado: Alto en sulfato", o "Trisulfato-aluminato Tricálcico Hidratado", aunque se la conoce comunmente con el nombre de "Ettringita", o "Sal de Candelot y Michaelis", o "Bacilo del Cemento".

b) Para el caso de la segunda fase o "Fase AFm": "Monosulfoaluminato Tricálcico Hidratado", o "Monosulfoaluminato Hidrato", o "Monosulfoaluminato",

o "Monosulfato", o "Monosulfo", o "Sulfoaluminato del Calcio Hidratado: Bajo en Sulfato", o "Monosulfato-aluminato Tricálcico Hidratado"; a esta fase, a diferencia de la anterior, no se la conoce con nombre común alguno, por lo que a lo largo de este trabajo se la designará Fase AFm, o simplemente AFm.

Y por último, para las sales de la Categoría B se sigue una denominación análoga.

La importancia de los mencionados tipos de sulfatoaluminatos de calcio hidratados, sales de la categoría A, y en especial de la ettringita, estriba en la influencia que ejerce sobre la hidratación de los cementos por los siguientes motivos:

- a) por provocar retraso en el tiempo de fraguado de aquellas pastas de cemento portland que tienen un exceso de yeso,
- b) por ser causa y efecto de la desintegración del hormigón de cemento portland por ataque sulfático,
- c) por ser el origen de las elevadas resistencias mecánicas iniciales de los cementos sobresulfatados,
- d) por ser también causa y efecto del autopretensado de hormigones de cemento expansivo, ya que estas fuerzas expansivas, controladas debidamente pueden utilizarse para desarrollar esfuerzos de compresión de valor cuantificable y determinado (46) (47) (48) (49).

De todos ellos, los dos últimos fenómenos, c) y d), se les puede catalogar de no nocivos o beneficiosos, mientras que a los primeros, a) y b), de perjudiciales o dañinos, y de un modo especial al b).

Por el contrario los sulfato-ferritos de calcio hidratados han sido menos investigados, presumiblemente por menor nocividad (34) (37) para el hormigón de cemento portland, pues en la bibliografía estudiada, no se han encontrado casos reales evidentes en donde se reseñan fenómenos nocivos inmediatos (que hayan tenido lugar en un período de tiempo de 30 ó 40 años), producidos por estos compuestos, y si sólo predicciones de vida útil para algunos hormigones de tal tipo de cemento portland que los puedan originar en gran cuantía (como son los actuales cementos PY españoles y similares de otros países, -cemento tipo V en USA-) de menos de 50 años, como han demostrado, tras sus investigaciones al respecto, Kalousek y colaboradores (35).

En resumen que dada la trascendencia e interés de los sulfato-aluminatos

de calcio hidratados, se ha considerado conveniente estudiarlos con más detalle, como se verá seguidamente, por su particular transcendencia en este trabajo.

(A) LA ETTRINGITA O "Fase AFt"

De acuerdo con Dana (50), la ettringita, o Fase AFt, como mineral natural, se encontró por vez primera en 1.847 en inclusiones calizas de lava cercanas a Ettringen y Mayen próximos a Coblenza, Renania, y consistían en diminutos cristales hexagonales coloreados. También se detectó acompañando a la afwillita en la zona de contacto entre calizas y doleritas en Scawt Hill, próximas a Larny County, Irlanda. Y del mismo modo aparece en las minas de Lucky, Tombstone, Cochise y County, en Arizona, USA, como producto de alteración de silicatos y aluminatos de calcio y aluminio.

En 1892, Michalis atribuyó expresamente, por vez primera, el ataque sulfático de los hormigones de cemento portland, a la formación y presencia de ettringita en su seno, por cuyo motivo la denominó "Bacilo del Cemento".

Posteriormente Lerch y colaboradores (42), tras informar que en 1890 Candlot la había preparado sintéticamente, en forma de esferulitas de algunos mm de diámetro, mezclando disoluciones saturadas de aluminato de calcio y sulfato de calcio, harían un estudio detallado del sistema para establecer como Kühl, la existencia de dos compuestos, uno "alto en sulfato" -la ettringita- y otro "bajo en sulfato" -el AFm-, que se verá más adelante. Para ello prepararon igualmente ettringita en forma de finas agujas alargadas, las cuales a veces también formaban esferulitas.

Desde entonces la ettringita ha sido y continúa siendo objeto de estudios físico-químicos muy completos, realizados ora para ver mejor sus posibles estructuras cristalinas, ora para conocer el contenido EXACTO de moléculas de agua, ora para comprender mejor la causa EXACTA de su efecto expansivo perjudicial o beneficioso, en su caso, etc. De aquí que no debe extrañar la abundancia bibliográfica que existe al respecto concatenada casi cronológicamente hasta nuestros días. .

Así tenemos que Jones (51), Kalousek (53) (54) y D'Ans y Eick (55) principalmente, exploraran el sistema cuaternario  $\text{CaSO}_4$  -  $\text{CaO}$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{H}_2\text{O}$  a 20° C y 25° C, para que a continuación Eitel (56) glosara tales trabajos aclarando algunos extremos y mejorando la representación gráfica del sistema, que se encuentra en las Figs. 2 y 3.

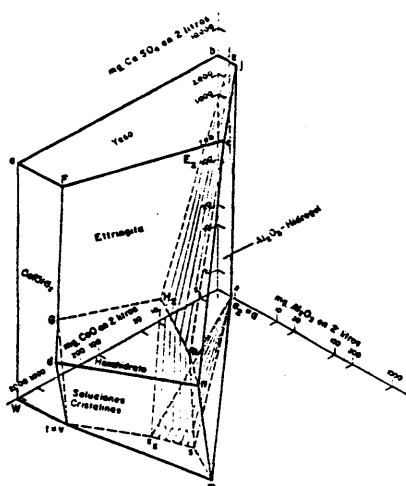


DIAGRAMA DE CRISTALIZACION METAESTABLE PARA EL SISTEMA  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaSO}_4-\text{H}_2\text{O}$  a  $20^\circ\text{C}$ ; LAS CONCENTRACIONES RESPECTIVAS ESTAN REPRESENTADAS EN COORDENADAS LOGARITMICAS  
JACL, Autor: Wilhelm Eitel.

Fig. 2

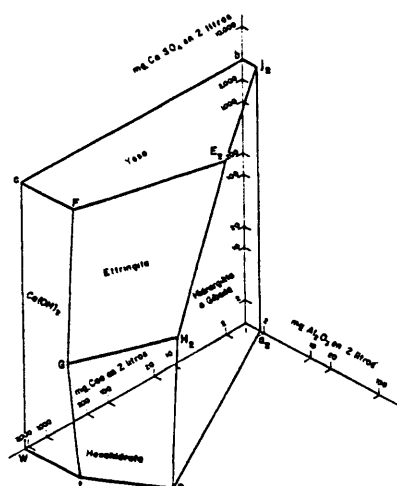


DIAGRAMA DE CRISTALIZACION ESTABLE PARA EL SISTEMA  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaSO}_4-\text{H}_2\text{O}$  a  $20^\circ\text{C}$ ; LAS CONCENTRACIONES RESPECTIVAS ESTAN REPRESENTADAS EN COORDENADAS LOGARITMICAS.

Fig. 3

En una apreciación general se puede decir que la ettringita forma cristales hexagonales, aciculares que se reúnen en agrupaciones estrelladas a modo de "erizo", siendo sus índices de refracción  $w = 1,464$ ,  $\epsilon = 1,458$ , su carácter óptico y su densidad 1,73 (12).

Dado que los cristales de ettringita preparados por Xalousek eran demasiado pequeños para que se pudiesen estudiar por MO Midgley y Pettifer (57), los obtuvieron de tamaño superior (muchos de ellos de dimensiones superiores a  $120\mu\text{m}$  de longitud y  $2-3\mu\text{m}$  de grosor), haciendo preparaciones adecuadas de cementos sobresulfatados. Del mismo modo los detectarían Schwiete y colaboradores (58), pero esta vez en forma de agujas muy pequeñas (de alrededor de  $0,25\mu\text{m}$  de longitud y  $0,05\mu\text{m}$  de diámetro). Igualmente Menta (59) informó que, en pastas de  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}-\text{CS}-\text{C}$  conteniendo una relación agua/sólidos baja, la ettringita se formaba a modo de cortos prismas hexagonales con una relación grueso/longitud de  $1/3$ , hecho que confirma en otro trabajo (60) pues dichos prismas cristalinos eran de alrededor de  $1\mu\text{m}$  de longitud y  $\frac{1}{3}\mu\text{m}$  de grosor. Más adelante el mismo autor (61), utilizando diversas mezclas a base de  $\text{C}_3\text{A}$  ó  $\text{CA}$ , por una parte, y yeso, anhidrita

y  $\text{MgSO}_4$  por otra, y todo ello en presencia, o no, de  $\text{Ca(OH)}_2$ , llega a la conclusión de que sólo se formaban delgadas agujas y esferulitas de ettringita siempre que hubiera suficiente "espacio útil" para ello, y en su defecto, caso de tener una relación agua/sólidos aún menor, la ettringita adoptaba la forma de los cristales prismáticos hexagonales cortos citados anteriormente. Y posteriormente el mismo autor (49), utilizando la MO y ME y nuevas mezclas distintas de los anteriores ( $\text{CA-CaO-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ,  $\text{CA}_2$ ,  $\text{CA}$ ,  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ ,  $\text{C}_3\text{A-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{AS}$  vidrio -  $\text{CaO-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ,  $\text{CAS}_2$  vidrio -  $\text{CaO-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ , pastas endurecidas, por autopretensado, de cemento de aluminato, o cemento expansivo tipo M), para obtener la ettringita, dentro de que en un medio saturado de  $\text{CaO}$ , se forma la ettringita de pequeño tamaño, análoga a la que frecuentemente aparece en la superficie de la fase aluminato original; por el contrario, en un medio con una concentración de  $\text{CaO}$  por debajo de la saturación se forma la ettringita de mayor tamaño y, frecuentemente, a cierta distancia de la superficie de la fase aluminato original. La ettringita hexaprismática de la pasta endurecida del cemento expansivo tipo M, al igual que la ettringita formada en un medio saturado de  $\text{CaO}$ , muestra unas dimensiones de  $0,1\text{-}0,2 \times 0,5\text{-}1,0 \mu\text{m}$ , mientras que la ettringita de la pasta de cemento de aluminato, en un medio de contenido de  $\text{CaO}$  menor al de saturación, exhibe unas dimensiones de  $0,5\text{-}1,0 \times 4\text{-}6 \mu\text{m}$ .

Igualmente ocurriría con el estudio y determinación del contenido EXACTO de moléculas de agua de la ettringita, que tras ser muy investigado y debatido durante las últimas décadas, ultimamente y pese a las dos versiones estructurales propuestas que existen, dadas por Bazjak y Jelenic (62) y por Moore y Taylor (63) e independientemente por Courtais, Dusanoy, Lafaille y Rotas (64), los investigadores Skoblinskaya y Krasilnikov (65), han demostrado, empleando diversas técnicas instrumentales, que la ettringita, como fase sólida individualizada, incluye únicamente 30 (treinta) moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  en su composición y que el exceso de moléculas de agua no sólo está presente en los canales intercristalinos, según los datos de Moore y Taylor, sino que también queda absorbido en las superficies de los cristales defectuosos, así como que en el caso de ettringita rehidratada, una parte de dicha agua en exceso puede estar condensada capilarmente.

Por último y respecto a la causa exacta del efecto o mecanismo expansivo inherente a la misma, ocurre todo lo contrario que en las dos características anteriores, ya resueltas, es decir, que son muchas las hipótesis más o menos empíricas o fundamentadas sobre el verdadero y auténtico mecanismo o mecanismos expansivos asociados con la formación de los sulfato-aluminatos de calcio hidratados en general y con la ettringita en particular (37)

(66), propuestas desde antaño hasta nuestros días, quedando, por tanto, aún pendiente, su resolución definitiva. Cada uno de tales mecanismos, generalmente, ha venido "clarificado" por su autor, merced a un modelo gráfico, o símil explicativo más o menos ingenioso, razonado y/o sofisticado, intentando con ello cada investigador explicar los efectos citados al principio, y entre ellos tenemos los siguientes:

1º Mecanismo "Through-Solution", conocido también como "discurrir de la disolución a través del hormigón": Según esta hipótesis la fase sólida reaccionante entra en contacto con la disolución "caminando con la misma", antes de precipitar como un nuevo producto sólido distinto del original. Esta hipótesis ya fue preconizada en su tiempo por Le Chatelier (67) y Lafuma (68) y actualmente entre sus principales partidarios se encuentran: Chatterji y Jeffery (69), Mehta (59) (61) (70), Collepardi y colaboradores (71), Jennings y Pratt (72), Mikhail y colaboradores (73), Bensted (75), Teoreanu y Dumitrescu (75), Negro y Bachiorrini (76), etc.

2º Mecanismo "Sólido-Líquido", conocido también como "topoquímico": Según esta hipótesis, el sólido reacciona con el medio líquido que lo circunda y se convierte en un nuevo producto sólido distinto y más estable que el original, encargándose dicho medio líquido de recibir y/o suplir el material necesario donde se requiera para alcanzar el equilibrio de la reacción en cada lugar, de aquí que pueda tener lugar, con o sin, disolución previa. Esta hipótesis, al igual que la anterior, fue preconizada por Le Chatelier y Lafuma, y actualmente entre sus principales partidarios se encuentran: Van Arkel (77), Hansen (78), Kolschutter (79), Chatterji (80), Mehta (81), (éste según Chatterji (82) pero no según el propio autor (83)), Brown (84), Schwiete y colaboradores (58), Grorab y colaboradores (85), Teoreanu y Dumitrescu (75), Cohen y Richards (86), etc. No obstante recientemente Mehta se preguntaba si las observaciones experimentales apoyan el deseo generalizado de muchos investigadores de aceptar esta hipótesis, pues según este autor las formas estructurales y sus consecuencias que Taylor (87) le atribuye al monosulfato-aluminato de calcio con 18 H<sub>2</sub>O, no son aplicables para el aluminato tetracálcico hidratado, ni para la ettringita.

3º Mecanismo de las "Presiones Osmóticas":

Según esta hipótesis, se sugiere que los cambios de volumen de morteros y hormigones endurecidos por formación de ettringita expansiva, son similares a los que se originan en el hinchamiento de geles de arcilla.

Entre los principales partidarios está Thorvaldson (88), aunque Lea (17) pone ciertas objeciones al mismo.

4º Mecanismo de "Crecimiento Anisotrópico":

Según esta hipótesis, el mecanismo en cuestión es similar al del fraguado del yeso de París, y pese a que el volumen total de sólidos y agua presentes disminuya, se arguye que el espacio efectivo adoptado por la masa de cristales de yeso entrelazados, se ve aumentado, aunque con ciertas cavidades en su interior. Esta hipótesis fue también preconizada por Le Chatelier (67) y entre sus principales partidarios se encuentran: Michaelis (41), -aunque Strelkov (89) le pone objeciones- y Benture Ish-Shalom (90).

5º Mecanismo de la "Ettringita Coloidal":

Según esta hipótesis, en este mecanismo existen tres fases o estadios:

1ª fase: En presencia de hidróxido de calcio, CH, la naturaleza de la ettringita que se forma sería coloidal, no adoptando por tanto la forma de "largas varillas prismáticas hexagonales". Pues bien, sólo esta ettringita de tipo coloidal es capaz de originar grandes expansiones.

2ª fase: Para que la ettringita coloidal origine grandes expansiones habría de estar en contacto con una fuente externa de agua.

3ª fase: La ettringita coloidal, de alta superficie específica, tiene una estructura cristalina peculiar, como propusieron Moore y Taylor (63), con carga neta negativa, lo cual podría originar, una atracción de moléculas de agua, que rodeando a la partícula de ettringita coloidal, originaría repulsiones inter-partículas, debido al potencial Z, origen del efecto expansivo global.

Entre los principales partidarios están: Mehta y Roy (60), Mehta (91), Mehta y Faichung (42) (en hipótesis), Negro y Bachiorini (93) y Rosetti, Chiochio y Paolini (94).

6º Mecanismo de "Crecimiento Cristalino por Presión":

Según esta hipótesis está completamente demostrado que un cristal sometido a la acción de un peso y en una vasija que contenga una disolución sobresaturada del mismo, crece por todas sus caras, pero las aristas de su base tienden a crecer más rápidamente que el resto de sus caras. Tales cristales tienden a formar una pirámide escalonada cuya base tiene una



forma cóncava. Entre los principales partidarios están: Becker y Day (95), Taber (96), Kalousek y Benton (97).

Esta hipótesis explica las observaciones de Chatterji (98), Seligman y Greening (99) y Rosetti, Chiochio y Paolini (94).

Pues bien, una vez realizado este estudio bibliográfico sobre los distintos mecanismos hipotéticos existentes, más o menos fundamentados, cabe señalar por nuestra parte que:

- 1ª.- La presencia de algun(os) autor(es) en dos o más mecanismos simultanea o sucesivamente, no tiene otro significado más que,
  - o bien dichos mecanismos pueden ocurrir simultanea o progresivamente, en mayor o menor cuantía, a lo largo de las distintas fases del fraguado y endurecimiento de la pasta cementante correspondiente,
  - o bien que habiendo sido partidario(s) de un primer mecanismo, su(s) investigacion(es) posterior(es) sobre el tema en cuestión, le(s) ha(n) hecho admitir, o no, otro(s) mecanismo(s), siendo por tal motivo el de through-solution y el topoquímico los más controvertidos de todos.
- 2ª.- A la vista de los trabajos reseñados, se puede aceptar que la presencia de los mencionados sulfato-aluminatos de calcio hidratados, produce, a veces, fenómenos destructivos en multitud de obras civiles de hormigón.

Unicamente basta decir al respecto que en este campo concreto que afecta o puede afectar al hormigón, se habla a veces de la existencia de una ettringita "PRIMARIA", o "Tipo 1", o "MACROCRISTALINA", colmatadora, origen y fuente de la creación de grandes resistencias mecánicas, beneficiosas y no nociva a los efectos c) y d) citados en la pág. 28 , y una ettringita "SECUNDARIA", o "Tipo 2", o "MICROCRISTALINA", de menor tamaño que la anterior, disruptiva, origen y fuente de pérdida de rigidez y resistencias mecánicas, perjudicial y nociva y adscrita a los efectos a) y b) citados en la página 28 . Y el cómo, cuándo y donde se forma o puede formar cada una de ellas lo justifica Kennedy (100) refiriendo que el producto de la reacción entre el  $C_3A$  y el yeso, es ettringita, la cual ocupa mayores volúmenes

que la suma de los dos componentes originales de forma separada; no obstante si esta reacción llega a su final, dice el autor, o se completa durante las primeras 24 horas de edad, a temperatura normal del laboratorio, el conjunto de la pasta cementicia donde transcurre dicha reacción es lo suficientemente plástico como para "acomodar" el cambio de volumen y su efecto expansivo anejo, sin perjuicio o daño alguno de todo el conjunto, de hecho, y según el autor, el cambio de volumen medido es mínimo (esta primera ettringita es la "primaria", o "macrocrystalina", o beneficiosa). Por otra parte, si un exceso de iones sulfato, no consumidos en las primeras edades, de origen propio y/o ajeno, permanecen y/o acceden, respectivamente, a toda la pasta cementicia después de las primeras 24 horas y por ende generalmente fraguada y endurecida, la expansión subsiguiente que originan con más  $C_3A$  sobrante, se debe igualmente a la formación de más ettringita (esta segunda ettringita es la "secundaria", o "microcrystalina", o perjudicial). Esta hipótesis le sería rebatida con notable precisión, merced a la cuantificación química de su razonamiento, por Hansen (101), el cual logra demostraros que si tal ocurriera no se produciría un aumento de volumen, sino todo lo contrario, es decir, una disminución.

Por el contrario y recientemente Xue Jua-G an y colaboradores (102), por un lado y Mehta (49) por otro, tras asignarle este último el calificativo de "microcrystalina" a la ettringita "secundaria", o "tipo 2", con lo que obviamente calificaba, quizás sin proponerse, de "macrocrystalina", a la ettringita "primaria", o "tipo 1", han afirmado que esta última se forma en condiciones de baja concentración de iones hidróxido, o lo que es lo mismo la concentración de  $Ca^{2+}$  del medio, menor que su valor de saturación, según los primeros, predominando, generalmente, según el segundo, en los procesos de hidratación de los cementos sobresulfatados y/o de rápido endurecimiento, los cuales están formados, en mayor o menor grado, por  $C_2S$ ,  $C_4\overline{AS}$ ,  $C_4AF$ , y  $CS$ , produciéndose de este modo los efectos beneficiosos de todos conocidos y que caracterizan a tales tipos de cementos, por todo lo cual propondría finalmente el autor que tales tipos de "microcristales" de ettringita no son expansivos.

Asimismo, pero por idénticas razones opuestas los autores mencionados anteriormente calificarían de expansiva a la ettringita "microcrystalina", que se forma en un medio de alta concentración de iones  $OH^-$ , o lo que es lo mismo de concentración de  $Ca^{2+}$  idéntica a la de saturación, según aquellos.

Tales calificativos de PERJUDICIAL o BENEFICIOSA a la ettringita expansiva,

o no, respectivamente, dependen pues, según los autores, de las condiciones existentes en el entorno en el momento de la formación de cada una de ellas y entre las cuales se encuentran, la retracción, la rigidez o dureza del sistema y la concentración respectiva de iones  $\text{OH}^-$  (o bien de  $\text{Ca}^{2+}$ ) y  $\text{SO}_4^{2-}$  en la disolución de contacto, habiendo observado Mehta experimentalmente que la ettringita "microcristalina" es capaz de absorber gran cantidad de agua sobre su superficie, origiando con ello cambios considerables de volumen en toda la masa del hormigón con sus efectos perjudiciales correspondientes.

B) EL MONOSULFATO-ALUMINATO DE CALCIO HIDRATADO O "FASE AFm"

En una apreciación general se puede decir que el monosulfato-aluminato de calcio hidratado, o Fase AFm, forma placas hexagonales y agujas, cuyos índices de refracción son  $n_w = 1,504$ ,  $n_e = 1,488$ , su carácter óptico es negativo y su densidad es 1,95 (16). Este compuesto forma solución sólida en placas también hexagonales con el  $4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 12 \text{H}_2\text{O}$  ó  $\text{C}_4\text{AH}_{12}$ , que se parece mucho en la forma del cristal y en el diagrama de DRX, pero a diferencia de la ettringita no hay pruebas de que forme solución sólida con el monosulfato-ferrito correspondiente. Esta forma baja en sulfato se conoce desde 1929 (17).

La importancia de este sulfato-aluminato de calcio hidratado estriba en que han sido dos, Chatterji y Jeffery (80) los investigadores que conjuntamente le atribuyeron por vez primera la capacidad de crear expansión tras su formación y desarrollo posterior, en su caso, a partir de la hidratación previa de todas las fases aluminicas del cemento, las cuales, una vez como  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ , al estar expuestas a la acción de los iones sulfato, pasan a monosulfato-aluminato de calcio hidratado con doce moléculas de agua de constitución, o Fase AFm, fenómeno éste que se atribuye a un proceso de cambio de ión de tal modo que un ión  $\text{SO}_4^{2-}$  sustituye a dos grupos  $\text{OH}^-$ . Este paso puede ir acompañado, según algunos autores, por un primer aumento de volumen, dependiendo de la presencia o ausencia del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  necesario y suficiente para ello; a continuación y con un exceso de iones  $\text{SO}_4^{2-}$ , se puede producir un segundo aumento de volumen, superior al primero, al pasar el AFm a Aft o ettringita, mediante el mecanismo hipotético de "Through-solution", antes citado.

C) OTROS COMPUESTOS

Finalmente, se ha de constatar aquí que a diferencia de lo acaecido con los sulfato-aluminatos de calcio hidratados y sulfato-ferritos correspondientes, que por su manifiesta influencia en la durabilidad de los cementos han llegado a constituir ente propio de investigación dentro del mundo de los silicatos en general y del cemento en particular, no ocurre lo mismo con los SULFATO-SILICATOS DE CALCIO HIDRATADOS respectivos, ya fueren o no expansivos, los cuales brillan por su ausencia tanto en la bibliografía consultada como en la experimentación teórica y/o práctica llevadas a cabo para su búsqueda. Pese a ello y dada la posible e indudable trascendencia que pudieran poseer, en su caso, en relación con este trabajo, no se han querido pasar por alto, por lo que se les ha dedicado a continuación la atención que merecen:

En 1925, por vez primera y una vez más Lafuma (103), abscribe la fórmula  $9 \text{CaO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{CaSO}_4 \cdot 80 \text{H}_2\text{O}$  a un POSIBLE compuesto procedente de disoluciones cristalinas PROBABLES, originadas al poner en un medio sulfático los compuestos de fórmula  $9 \text{CaO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 12\text{H}_2\text{O}$  y/o  $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSiO}_3 \cdot 30-32\text{H}_2\text{O}$ , los cuales, en condiciones normales de utilización de los hormigones podrían dar, según el autor, el compuesto citado al principio; compuesto puesto en duda por Steinour (104) al comentar con énfasis que Lafuma no alega haberlo observado de un modo tangible y claro, sino mas bien como una cierta PROBABILIDAD teórica de que pueda existir.

Bastantes años después, Turriziani y colaboradores (105), referirían, tras sus trabajos, que si la ettringita se trata con puzolanas altamente silíceas en solución acuosa, "se hidroliza" casi completamente, lo cual hace suponer que no se forma el sulfato-silicato de calcio hidratado correspondiente, o que si se forma no es expansivo.

Más adelante Moore (106) estudiando la clinkerización y sus productos resultantes tras el enfriamiento subsiguiente, demuestra la posibilidad real de sustitución isomórfica, inversa a la isocuántica, del ión  $\text{Al}^{3+}$ , del  $\text{C}_3\text{A}$ , por  $\text{Si}^{4+}$  ó por  $\text{Fe}^{3+}$ , para provocar desequilibrios termodinámicos en el cristal de origen, aunque no referiría nada de que tras la hidratación selenitosa de áquel se formasen, ni cuali ni cuantitativamente, como resultado de la misma, los sulfato-silicatos de calcio hidratados, expansivos o no, antes citados, probablemente por su dificultad termodinámica manifiesta de mantenerse aquellos hidratados y en equilibrio estable a temperatura ambiente.

Posteriormente y casi recientemente Lukas (107) hablará de la existencia de un compuesto de fórmula  $\text{Ca}_6 [\text{Si}(\text{OH})_6]_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O} (?)^*$ , aunque pese a emplear casi todas las modernas técnicas analíticas (DRX, IR, IR, MO, ME), no pudo demostrar tangiblemente su presencia.

Más adelante y ya en la actualidad, Diamond y Lachowski (108) estudian por ME (SEM y TEM) partículas individuales de ettringita que se encuentran en pastas de cemento, adscritas morfológicamente todas ellas al grupo Aft "defectuoso" o ettringita "defectuosa"; tales deficiencias, ligeras o mayores, en aluminio y/o azufre, pueden ser compensadas a la vez y paralelamente, según los citados autores, la primera por sustitución isomórfica de silicio, y sorpresivamente no de hierro, y la segunda, en forma del anión sulfato,  $\text{SO}_4^{=}$ , por dos hidroxidos,  $2\text{OH}^-$ , o por un carbonato,  $\text{CO}_3^{=}$ .

Finalmente y en la actualidad Menta (49) refiere que, desde el punto de vista de la resistencia al ataque de los iones sulfato, al igual que ocurre con el ión hierro, como  $\text{Fe}^{3+}$ , el silicio,  $\text{Si}^{4+}$ , también resiste al citado ataque.

\* - Interrogante existente, tal cual, junto a la citada fórmula en la publicación del trabajo del autor, y cuyo significado es obvio.

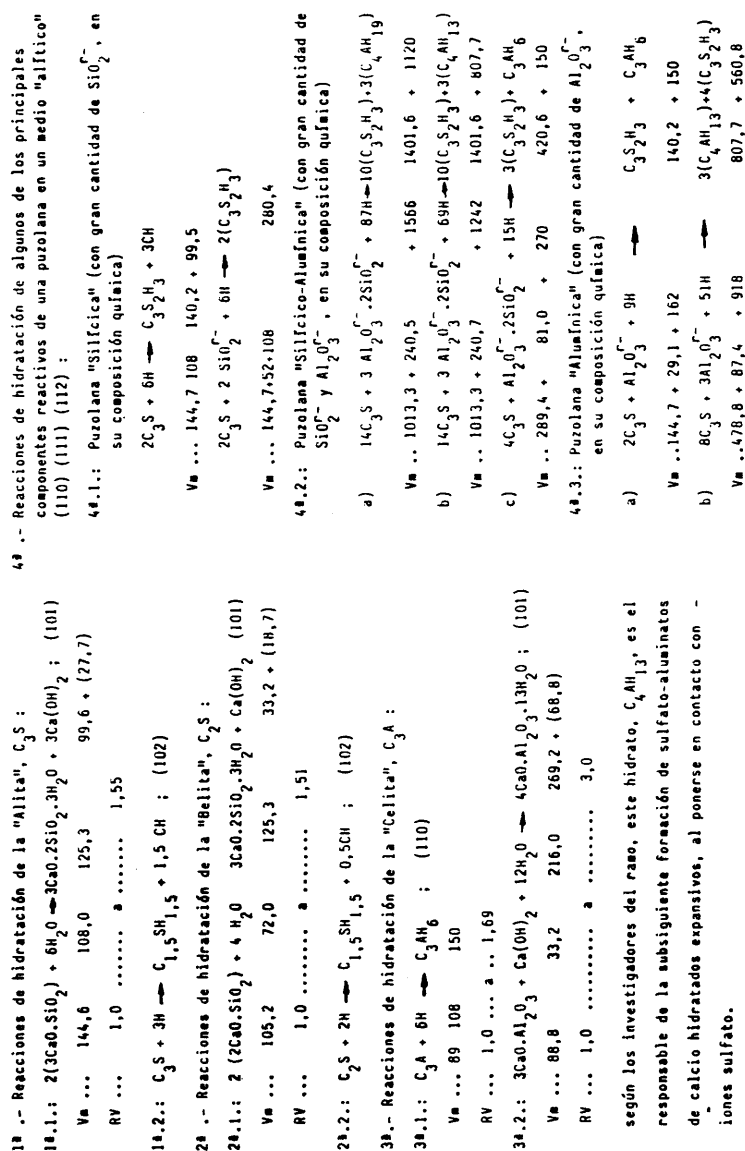
IV.2. Reacciones de hidratación del cemento que, en teoría, llevan o pueden llevar implícito, en mayor o menor grado, un aumento de volumen.

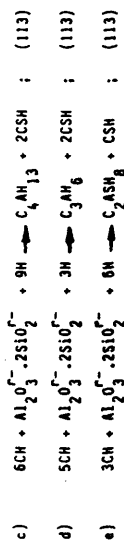
Reacciones Expansivas:

En este apartado se incluye una breve recopilación de aquellas reacciones de hidratación simple ó selectiva de los constituyentes del cemento portland más afines con este trabajo, y que experimentan por tal motivo un incremento de volumen de distinta magnitud.

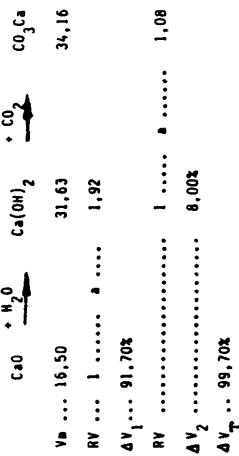
Todas y cada una de ellas se exponen tal cual a continuación según las propusiera(n) su(s) respectivo(s) autor(es), cuya cita bibliográfica correspondiente figura adjunta, así como también, y en su caso, los Pesos Moleculares,  $P_m$  (g), Volúmenes Moleculares,  $V_m$  ( $\text{cm}^3$ ), Relaciones  $\frac{\text{Volumen Inicial}}{\text{Volumen Final}}$ ,  $RV$ , e incrementos de Volumen,  $\Delta V$ , respectivos. No obstante, y pese a no corresponderse en ocasiones algunos simbolismos expuestos por determinados autores, con los recogidos en las Tablas del PREFACIO por no juzgarlo necesario, aquellos continúan siendo lo suficientemente comprensibles para investigadores, fabricantes y usuarios del ramo.

IV.2.1.1. - Formación de compuestos hidratados a partir de los compuestos mineralógicos del clinker:

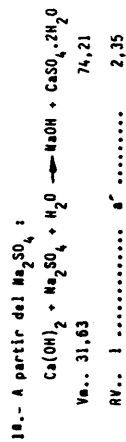




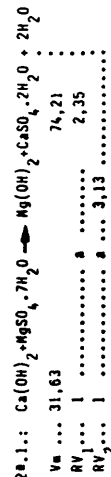
5a.- Reacciones de hidratación y subsiguiente carbonatación de la "Cal libre" y/o de la "Portlandita", (81) (114) (115), originada en las hidrataciones anteriores :



IV.2.2. formación de yeso "secundario" (74) (110) (116) (120), a partir de sulfatos alcalinos y/o alcalinotérreos ajenos al propio cemento y que en forma de disolución acuosa entran en contacto con él :



2a.- A partir del  $MgSO_4$  :



Con relación a la génesis de yeso por esta vía y en conexión con lo expuesto en la pág.30, muy recientemente Mehta (49) refería que como resultado de la formación de yeso por ataque de sulfatos de Na, K, y/o Mg, se producía una adsorción de sulfato por el CSH, originando con ello alguna disminución de la rigidez de la pasta de cemento la cual viene precedida de grandes expansiones debido a la formación de ettringita y proponiendo, al respecto, que sólo la ettringita pobremente cristalina ó "microcristalina" es capaz de expandir por adsorción de agua, con lo que un descenso de la concentración de iones  $OH^-$  y un aumento de la concentración de iones  $SO_4^{2-}$  en el entorno, disminuye por un lado, como decíamos, la rigidez de la pasta de cemento endurecida y por otro aumenta la capacidad de adsorción de agua por la ettringita microcristalina lo cual ocurriría paralelamente a una segunda génesis de yeso.

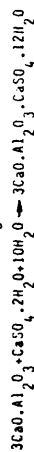
No obstante y de hecho, el proceso disruptivo de cementos, morteros y hormigones, no se limita a alguna de las reacciones expuestas hasta ahora sino que, por desgracia, continúa complicándose con la formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados expansivos, ya que el  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , originado ("secundario"), en su caso, añadido a propósito, como sucede en este trabajo ("primario"), o cuando se encuentra en contacto al hornear con aguas seleniticas y/o terrenos yesíferos circundantes, reacciones principalmente con aquellos compuestos, bien del cemento, de las posibles adiciones o ciertos áridos, como veranos, que posean el catión aluminio,  $Al^{3+}$ , en mayor o menor cuantía, no existiendo requisito alguno, como se verá en la pág.78 sobre los orígenes o fuentes del mismo así como las del ión sulfato necesario para tal fin (83).



IV.2.3. Formación de sulfato- aluminatos de calcio hidratados más o menos expansivos.

1a.- Formación de monosulfato-aluminato de calcio hidratado con doce moléculas de agua de constitución, Fase AFm:

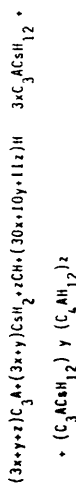
1a.1.: a partir de la "Celita",  $C_3A$  (101)



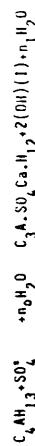
Vm ... 88,8 74,1 180,0 319,1 + (23,8)

RV ... 1 ..... a ..... 3,6

1a.2.: a partir de la "Celita" (124)



1a.3.: a partir del  $C_4AH_{13}$  (80)

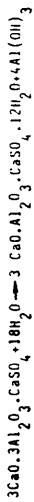


Vm ... 277,37 312,68

RV ... 1 ..... a ... 1,127

$\Delta V$  ... 14%

1a.4.: a partir del componente expansivo  $C_4A_3S_3$ , H y (a/c) - 1 (75)

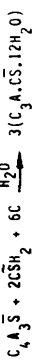


Vm ... 235 324 319,1 + (23,8) 126,75

RV ... 1 ..... a ... 1,46

V ... 45,92

1a.5.: a partir del componente expansivo  $C_4A_3S_3$ ,  $CSH_2$  y C (116)(117)

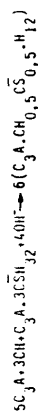


Vm ... 235 148,42 99 957,3

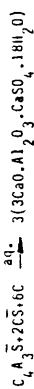
RV ... 1 ..... a ..... 4,07

$\Delta V$  ... 307,46%

1a.6.: a partir de la ettringita (118)



2a.- Formación de monosulfato-aluminato de calcio hidratado con dieciocho moléculas de agua de constitución a partir del clinker expansivo  $C_4A_3S_3$  (81)



Vm ... 235 92 101 1100

RV ... 1 ..... a ..... 4,68

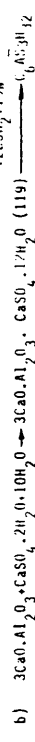
3a.- Formación de ettringita:

3a.1.: a partir del  $C_3A$



Vm ... 88,8 222,3 450,0 714,7 + (46,4)

RV ... 1 ..... a ..... 8,0



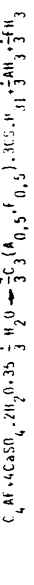
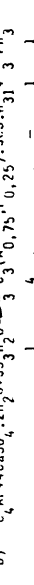
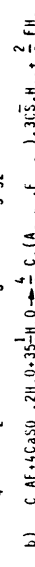
Vm ... 88,8 74,1 180,0 319,6 + (23,3)

RV ... 1 ..... a ..... 3,6

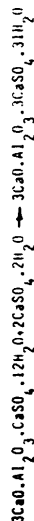
c)  $C_3A + 3CSH_2 + 26H \rightleftharpoons C_6A_5H_{32}$  (90)

Vm ... 89 223 468 725

3a.2.: a partir del  $C_4AF$



30.3.: a partir de la fase AFm (108)

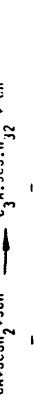
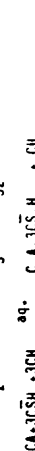
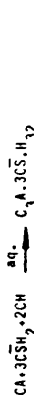
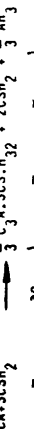
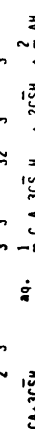
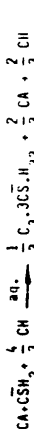
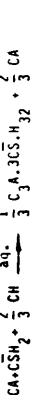
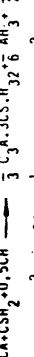
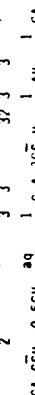
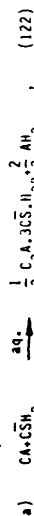


Va ... 31910 148 714

RV ... 1 ..... a .... 2,24

AV ... 55,22%

30.4.: a partir de aluminato monoclásico:



30.5.: a partir del clínker expansivo  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ :



Va ... 235 2143

RV ... 1 ..... a ..... 9,12

b) sin tener en cuenta el agua de amasado , (84)

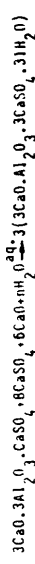


Va .. 235 368 101 2143

RV... 1 ..... a ..... 9,12

c) agua de amasado, alrededor del 30%, en peso, de

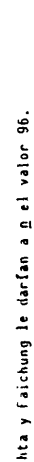
sólidos , (81) (92) (90)



Va .. 235 368 101 609 2143

RV... 1 ..... a ..... 9,12

Mehta y Faichung le darían a  $\bar{n}$  el valor 96.



Va... 235 593,68 99 2144,1

RV... 1 ..... a ..... 9,12



la conversión del  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$  en ettringita va acompañado de un

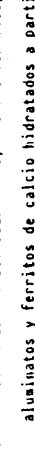
notable aumento de volumen, mayor de 9 veces, según estos

autores.

4A.- Formación de sulfato-aluminatos, sulfato-ferritos,

aluminatos y ferritos de calcio hidratados a partir

del  $\text{C}_4\text{AF}$  (124)



#### IV.3. Generalidades sobre la Resistencia a los Sulfatos de los Cementos Portland.

##### Consecuencias: Especificaciones existentes

Antes de todo, se desea aclarar que el título de este apartado no se corresponden para nada con el que personalmente le daríamos, que sería, como se dijo en la pág.3 el de la resistencia al ataque de los iones sulfato; no obstante se ha puesto así por ser aquella, y no ésta, la expresión más generalizada tecnológicamente, aunque no más científica, del mismo en este campo, y como tal aparecerá a lo largo de las referencias bibliográficas que se exponen a lo largo de este apartado.

Así pues y volviendo al tema que nos ocupa tenemos en principio que para T. Merriman (128) existe una relación muy estrecha entre la resistencia química a una disolución de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  al 10% de 32 cementos portland ensayados por el Comité C-1 sobre Cementos de la ASTM y el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  de los mismos. Los valores que obtuvo le sirvieron para clasificarlos en:

- "buenos": cementos portland, cuyo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  se encuentra comprendido entre el 6% y el 9%.
- "regulares": cementos portland, cuyo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  se encuentra comprendido entre el 10% y el 12%.
- "malos" : cementos portland, cuyo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  se encuentra comprendido entre el 13% y el 14%.

Por otra parte Michaelis, Candlot, Pasov (142) y otros investigadores definen la existencia de una relación muy estrecha entre la resistencia de un hormigón a los sulfatos y el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  (calculado) por las fórmulas de Bogue), del cemento con que se fabricó. Tal relación llega a cuantificarla hasta tal punto que con ella logran una nueva clasificación de las distintas clases de cementos portland y que es como sigue:

- "nula", si el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  (calculado) es  $> 7\%$
- "débil", si el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  (calculado) es  $= 7\%$
- "regular", si el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  (calculado) es  $= 5\%$
- "buena", si el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  (calculado) es  $< 5\%$

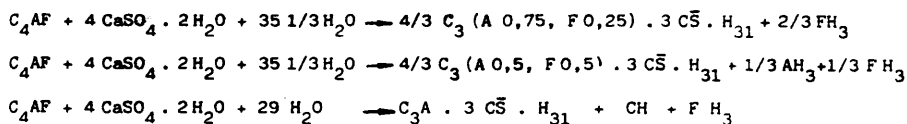
Igualmente Thorvaldson (142) y colaboradores hallarían que la resistencia química frente a los sulfatos de las probetas de cemento portland aumentaba

considerablemente sustituyendo el  $C_3A$  por el  $C_4AF$ . Esto sería también corroborado por Fleming, según el cual los cementos portland con un contenido del 3% al 8% de  $C_3A$  y del 12% al 13% de  $C_4AF$  (calculados), mostraban mayor resistencia a disoluciones de  $Na_2SO_4$  que los cementos portland con un 6% al 8% y 12,5% de  $C_4AF$  (calculados).

Igualmente Bogue, Lerch y Taylor (44) determinarían también que con bajos contenidos de  $C_3A$ , todos los cementos demuestran ser resistentes a los sulfatos, independientemente de la relación  $C_3A/C_2S$ .

En la serie interminable de ensayos de este tipo llevados a cabo en diversos países no podríamos dejar de citar, por su trascendencia, los iniciados por los norteamericanos a escala semi-real en la década de los años cuarenta y de los que da cuenta en la publicación Long-Time Study of Cement Performance in Concrete (8) que comprende cuatro primeros capítulos dedicados a la recogida y definición de un gran número de cementos portland comerciales y un quinto dedicado a la puesta en práctica y estudio de la acción agresiva sulfática sobre una gran multiplicidad de hormigones fabricados con cada uno de ellos. De los resultados obtenidos en la primera década se ha confirmado una vez más que la resistencia a los sulfatos de un cemento portland es función directa de su contenido potencial de  $C_3A$ , calculado por microscopía óptica.

Así han podido llegar a la década de los años 70 para tras realizar otros trabajos adicionales (35), no sólo confirmar lo ya conocido, sino también poder decir entre sus conclusiones lo que se dijo en la pág.24, que las limitaciones impuestas, en la normativa correspondiente, sobre los contenidos potenciales de  $C_3A$  y  $C_4AF$ , no son la última y por ende mejor respuesta al problema del ataque sulfático; y ello debido probablemente a la posibilidad de formación mucho más lenta, pero quizás no por ello menos segura en el tiempo (algunas décadas), de sulfato-aluminatos de calcio hidratados expansivos a partir de aluminio del  $C_4AF$  y/o incrustado mínimamente en los silicatos, como recientemente han demostrado Collepardi y colaboradores (121), para a continuación confirmarlos cinéticamente Fukahara y colaboradores (125) los cuales proponen como reacciones posibles una de las siguientes:



Así pues, según todo lo citado, la naturaleza química fundamental del ataque y consiguiente destrucción del hormigón de cemento portland, era de tipo sulfático; por ello el desarrollo de los estudios y ensayos subsiguientes de la resistencia de tales tipos de cementos al ataque de los sulfatos, se centraría principalmente sobre la constitución y composición mineralógica de sus clínteres respectivos. Tales estudios, ya revisados (16), demostrarían que la fase  $C_3A$  del clínter era la más vulnerable de todas por el ataque sulfático, e igualmente demostraría que, a igualdad de tiempo, la fase  $C_4AF$  lo era bastante menos; de aquí que el nuevo balance entre ambos compuestos se trató de conseguir mediante el empleo como fundente de más óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ), en detrimento del de aluminio, ( $Al_2O_3$ ), en el crudo, en cantidad necesaria y suficiente para favorecer la formación de una mayor cantidad de  $C_4AF$  y/o  $C_2F$  y/o solución sólida de ambos en relación al  $C_3A$ .

A todo ésto la fabricación de tales tipos de cementos portland resistentes al ataque sulfático, era ya una auténtica realidad, en los países industrializados, más casual que causal, para posteriormente invertirse intencionada, racional y conscientemente, merced al empleo de la nueva dosificación química aludida, del crudo respectivo.

Estos nuevos tipos de cementos portland de elevada resistencia a los sulfatos, pese a adolecer en un principio de un fraguado lento y unas resistencias mecánicas iniciales bajas, se fabricarían y expedirían mucho antes de que aparecieran las primeras especificaciones al respecto de la ASTM.

Y llegados a este punto del nacimiento de las primeras especificaciones al caso, conviene relatar por su trascendencia presente y futura la historia del origen, desarrollo y posterior evolución de las especificaciones ASTM sobre los cementos portland resistentes a los sulfatos, e implícitamente sobre sus homónimos no resistentes, basadas todas ellas, como veremos, en limitaciones más o menos precisas, sobre los componentes mineralógicos,  $C_3A$  y  $C_4AF$  principalmente del propio cemento.

Así pues y por vez primera en 1940 impusieron una especificación mineralógica para cinco tipos de cemento portland, incluyendo entre ellos un cemento Tipo II, de moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación, y un cemento Tipo V de elevada resistencia a los sulfatos, habiendo sido hasta entonces tales especificaciones solamente de tipo químico, o composición química, para a continuación pasar a ser además, como decíamos, de tipo mineralógico, para lo que se basaron en normativas federales previas (126).

Más adelante, en 1942, al reconocerse las ventajas del aire ocluido, adoptaron una especificación adicional para el nuevo cemento portland Tipo II A, que venía a ser una segunda versión del ya existente Tipo II, sólo que con un agente ocluidor de aire.

Estas severas restricciones puestas en un principio sobre,

- los contenidos porcentuales de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , (valor máximo de ambos del 40% en peso)
- el Módulo de Fundentes =  $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3}$ , (comprendido entre 0,7 y 2,0 en un principio) y
- el contenido potencial porcentual de  $\text{C}_3\text{A}$ , (valor máximo del 5%, en peso),

sirvieron para limitar y disminuir la reactividad de los cementos portland Tipo V con los sulfatos, así como también impedir su lento fraguado y bajas resistencias mecánicas iniciales de los mismos.

Más adelante, en 1947, quitaron la limitación impuesta anteriormente sobre el Módulo de Fundentes, después de que se demostrara que al igual que el  $\text{C}_4\text{AF}$ , el  $\text{C}_2\text{F}$  también era estable ante el ataque de los sulfatos. Por todo lo cual el contenido permisible del contenido porcentual de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pasaría a ser del 5% en peso.

Dos años después, en 1949, sustituyeron la limitación química sobre el contenido porcentual de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  por otra equivalente de tipo mineralógico, y era que la suma  $2\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$  no excediera del 20% en peso, y simultáneamente quitaron la exigencia química existente sobre el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , para sustituirla finalmente, pero ya mucho más tarde, en 1963, por una exigencia mineralógica menos severa y era que para cementos con un contenido nulo de  $\text{C}_3\text{A}$ , la suma  $\text{C}_4\text{AF} + \text{C}_2\text{F}$  no excediera del 20%.

Diez años después, en 1959, añadieron una limitación mineralógica a los cementos portland de altas resistencias mecánicas iniciales (actuales cementos ARI españoles), Tipos III, III A, que fueran a estar expuestos a los sulfatos, consistentes en fijar en 8,0%, en peso, el contenido potencial máximo de  $\text{C}_3\text{A}$  para los mismos y que además deseaban ser de modera resistencia a los sulfatos, y en 5% en peso, para los de alta resistencia a los sulfatos. Por el contrario la limitación mineralógica sobre el contenido máximo de  $\text{C}_4\text{AF}$  de los cementos portland Tipo V no se fijó en esta ocasión.

Y así continuaron con ligeras modificaciones hasta nuestros días y de las que se hablará con algo más de detalle más adelante.

Finalmente y pese a que el comportamiento de los cementos portland en la realidad mostraba una general correlación con las exigencias químicas

y mineralógicas fijadas, se encontraron, no obstante, numerosas excepciones, hecho este reconocido ya desde 1940, las cuales, en un principio serían achacadas, entre otras, a la velocidad de enfriamiento de los clínkeres correspondientes. Estas discrepancias notables fueron las que hicieron surgir la necesidad de la creación y puesta a punto de un método acelerado de ensayo capaz de predecir con antelación y precisión el probable comportamiento real del cemento portland ensayado, y del cual se hablará con algo más de detalle en la pág. 104, y siguientes.

En definitiva que todos los trabajos de este tipo realizados a gran escala han servido para que gracias, entre otros, al problema del ataque de los iones sulfato a los cementos portland, clasificáramos en distintas clases, tipos y/o categorías. Dicha clasificación es, en general, más o menos común cualitativa, que no cuantitativamente, para todos los países industrializados, y como consecuencia de la misma nos los encontramos generalmente a todos ellos ordenados de mayor a menor contenido potencial de  $C_3A$ , según sean de escasa o elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, respectivamente.

Así, por ejemplo, mientras que en USA existen ocho tipos de cemento portland (6), I y IA, II y IIA, III y IIIA, IV y V, englobados, desde el punto de vista de su resistencia correspondiente al ataque de los iones sulfato, en tres categorías hipotéticas, dos de ellas señaladas expresamente en la norma y la tercera deducible, a saber:

- a) para elevada resistencias a los iones sulfato: cemento tipo V (cuyo contenido máximo permisible de  $C_3A$  ha de ser el 5% y de  $C_4AF + C_3A$  ha de ser el 25%).
- b) para moderada resistencia a los iones sulfato: cementos II y IIA expresamente (cuyo contenido máximo de  $C_3A$  ha de ser el 8%); no obstante y a tenor de esta limitación pensamos que se podría incluir igualmente dentro de esta categoría hipotética el cemento tipo IV, pues al tener como límite máximo el 7% en su contenido de  $C_3A$  queda dentro del 8,0% exigido para aquellos, y pese a que este cemento esté catalogado por la citada norma solamente como de "bajo calor de hidratación".
- c) el resto de los tipos de cemento, el III y IIIA, cuyo contenido máximo permisible de  $C_3A$  es del 15%, habrán de ser catalogados, aunque la norma ASTM correspondiente no lo diga de un modo expreso, como de baja, muy baja, mala o nula resistencia al ataque de los iones sulfato.

en el resto de los países industrializados y en especial Europa suelen existir dos clases o categorías de cementos portland, los que son de elevada

resistencia al ataque de los iones sulfato y los que no lo son tanto, variando fundamentalmente tan sólo de uno a otro, los valores de los contenidos respectivos de  $C_3A$  y  $C_4AF$  y/o  $C_2F$  y/o combinación expresa entre ambos como se dijo en la pág. 25.

En resumen que como consecuencia de todos estos trabajos y las especificaciones surgidas al amparo de los mismos sobre este tema en estas últimas décadas, debemos sacar las siguientes conclusiones:

- 1ª.- Que la gama total de los cementos portland nos viene clasificada por igual en todos los países industrializados en función de su distinto grado de resistencia a los iones sulfato.
- 2ª.- Que el contenido potencial de  $C_3A$  calculado, en %, de un cemento portland le "imprime muchísimo carácter" sobre su resistencia, o no, al ataque de los iones sulfato, habiendo surgido en la actualidad posibles dudas (35) al respecto sobre la idea generalizada de pro-resistencia al citado ataque de los compuestos de hierro del clínker, correspondientes.
- 3ª.- Que el entorno de variabilidad del contenido de  $C_3A$  calculado de los cementos portland, desde los resistentes a los no resistentes a los iones sulfato, está comprendido entre 0% y el 15%.
- 4ª.- Que como consecuencia de lo anterior no es de extrañar el encontrarnos actualmente en cualquier trabajo y/o cita afín, los cementos portland empleados en el mismo, ya fueren o no resistentes a los iones sulfato, ordenados de mayor a menor, o viceversa, contenido porcentual correspondiente de  $C_3A$  calculado, no siendo, por el contrario de igual rango de importancia, aunque si interesante, el contenido porcentual correspondiente de  $C_4AF$ ,  $C_3S$  y/o  $C_2S$ , por este orden, para igual fin.
- 5ª.- Que cada país suele tener, entre otros, un valor "frontera", además de algún otro, del contenido porcentual de  $C_3A$  del cemento, que separa nítidamente los cementos portland resistentes a los iones sulfato PY de los que no lo son, P, y que para España actualmente es del 5%.
- 6ª.- Que según todo lo anterior, a menor contenido potencial de  $C_3A$  de un cemento portland, menor ettringita expansiva podrá formar, menor expansión originará y más estabilidad de volumen, seguridad y larga vida útil, ante el ataque de aguas selenitosas, le proporcionará al hormigón con él preparado. Por ello el deber de un especialista y/o tratadista de esta temática ante un problema general no cuantificado ni cualificable es aconsejar el empleo, uso y consumo de aquellos



materiales que en esas o parecidas condiciones selenitosas originen la menor expansión posible y por ende posean intrínsecamente el contenido mínimo porcentual de  $C_3A$ , en valor absoluto o relativo, para producirla.

7ª.- Que la casuística inicial habida en los muchísimos ensayos previos llevados a cabo con cementos portland desemboca en una generalidad, las conclusiones anteriores, que da como fruto finalmente una solución concreta: La fabricación y puesta a punto de un nuevo cemento (actual PY español, o tipo V USA) para combatir el ataque sulfático y sus fatales consecuencias, el cual habrá de cumplir unas determinadas especificaciones al respecto.

8ª.- Que pese a todo lo anterior y a tenor de los trabajos llevados a cabo por Kalousek, Porter y Benten (35), en los que cuestionan con fundamento, que la vida útil de hormigones, confeccionados con cemento portland de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, que están en contacto con aguas selenitosas, pueda ser superior a los 50 años, cabe preguntarse: ¿Podrá haber alguna mejor respuesta a dicho ataque agresivo?, es decir, ¿Podrá haber algún cemento, si no portland solo, de mezcla, que pueda ser de resistencia más elevada aún que la de los propios portland de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato?. Esto es, como se verá, uno de los muchos objetivos de este trabajo de Tesis Doctoral.

#### IV.4. Generalidades sobre la Resistencia a los Sulfatos de los Cementos Puzolánicos

Como se decía en la INTRODUCCION y por las razones allí expuestas, paralelamente a toda la gama de ensayos llevados a cabo, principalmente en USA, con los cementos portland, se repetía lo mismo con los puzolánicos correspondientes a estos cementos además de con otros comerciales, merced a la adición seriada de una gran multiplicidad de materiales más o menos puzolánicos, por aquello de minimizar los males a base de disminuir lo más posible la fracción portland que era lo más susceptible al ataque de los sulfatos, y con ella la fracción C<sub>3</sub>A correspondiente, en toda la masa del hormigón.

Por todo ello Davis, R.E., Davis, H.E., Kelly, J.W. y Troxell, J.E., publicaron en 1935 los resultados de un denso trabajo (20) llevado a cabo al efecto, llegando a la conclusión de que al igual que ocurriera con los cementos portland, los puzolánicos mostraban idéntico comportamiento casuístico, es decir, que ante el ataque sulfático unos se portaban mejor y otros peor.

Un año después Tuthill (21), tras llegar a idéntica conclusión anterior, exigía, por vez primera, especificaciones precisas al respecto (al igual que ocurrió con los cementos portland) tanto para los cementos puzolánicos como para las puzolanas y clínkeres correspondientes empleados en su preparación. Evidentemente no se dieron dichas especificaciones con anterioridad porque, entre otras cosas, y a diferencia de lo que ocurriera con los portland, el problema era infinitamente más complejo al intervenir no sólo las características del clínker sino también las de las puzolanas.

Igualmente nos concluiría el autor que a diferencia de los portland no resistentes a los sulfatos, cuya respuesta en tal sentido suele ser relativamente rápida, los puzolánicos necesitaban por lo general mayores períodos de tiempo de exposición sulfática que aquellos para igual fin.

Paralelamente en la URSS, Baikov y Tumarev (127) referían haber comprobado que los cementos "portland-puzolana", eran considerablemente más resistentes al ataque de las disoluciones sulfáticas sódicas o cálcicas, que los cementos portland ordinarios, no señalando los autores en este trabajo las características estructurales de los referidos cementos.

Años más tarde Kalousek y Jumper (23), tras una investigación llevada a cabo al efecto con catorce cementos puzolánicos, dos de ellos "de laboratorio", obtendría la misma conclusión anterior, o sea, que unos puzolánicos se portaron mejor (los que llevaban como puzolana tierra de Santorin o vidrio vitrificado altamente silíceo), y otros no (los que llevaban como puzolana diversos materiales, más o menos arcillosos, calcinados).

Más tarde, Blanks (24) tras referir que las placas del ensayo Merriman (128) confeccionadas con cemento "portland-puzolana" mostraban una resistencia sulfática superior, afirmaría que merced a combinaciones convenientes de cemento portland y puzolanas "apropiadas"..., impartían al hormigón muchas de las cualidades pretendidas y deseadas, para finalmente reconocer y admitir la existencia de factores, desconocidos, total o parcialmente, del problema en cuestión.

Por otra parte y casi por las mismas fechas, se celebró en San Francisco, California, USA, el Simposio: SYMPOSIUM ON USE OF PUZZOLANIC MATERIALS IN MORTARS AND CONCRETES; First Pacific Area National Meeting, patrocinado por la ASTM (25). Entre los participantes cabe destacar a Davis que tanto a nivel personal como en relación con Hanna y Brown, llegan a las siguientes conclusiones:

- 1ª.- Cuando se usan puzolanas como sustituyentes de cemento portland, tipo I y II, de la ASTM, se mejora la resistencia a la acción de las aguas sulfáticas y en el caso particular de portland con altos contenidos en  $C_3A$ , dicha mejoría es aún más notable.
- 2ª.- Que como ocurriera con los cementos portland, aunque quizás por las mismas y/o diferentes causas, unos cementos puzolánicos resistían el ataque sulfático y otros no, existiendo por lo general, para el caso de los primeros, una relación directa entre el contenido de puzolana y la mejoría en resistencia sulfática subsiguiente, en comparación con el portland sin adición de puzolana, o portland matriz.

Por último Blanks (24) concluía tras sus trabajos que sólo determinadas combinaciones portland X (a base del tipo I, II, o III ASTM) puzolana Y, proporcionaban a la pasta, mortero u hormigón correspondientes, la tan anhelada resistencia a los sulfatos, desconociéndose las causas de tal evento. En este sentido y sólo a ese tipo de puzolana que mejoraba la resistencia a los sulfatos de portland tipo I, II o III correspondiente,

Davis (26) le daba el título de APROPIADA; y casi al mismo tiempo Higginson y Glantz (129) insistían en este sentido.

En España podemos decir que se seguía el tema con idénticas o parecidas conclusiones, y como prueba de ello A. López Ruiz (130), tras sus trabajos sobre esta temática, se hace partícipe de todo lo anterior, hasta tal punto que llega a generalizar, así sin más, que "los cementos puzolánicos presentan una resistencia a la acción de las aguas ricas en sulfatos muy superior a los portland", basándose para ello en la notoria particularización, como producto "único" de que "la puzolana" da productos "indiferentes" al agua de mar y a las aguas selenitosas.

De nuevo Tuthill incidirá, tras otros trabajos (131), en lo mismo, empezando a señalar, al igual que Bogue (5), que todos los cementos puzolánicos que mostraban buen comportamiento ante el ataque sulfático, tenían de común como puzolana, materiales más bien silíceos, vítreos y activos, como tierra de diatomeas, rocas opalinas y similares. Esta mejoría en resistencia al ataque sulfático que tan específicos materiales proporcionaban a sus fracciones portland acompañantes respectivas, serviría de estímulo para perseverar en estos trabajos a fin de que, dada la similitud de calificación de otros afines, hacerlos extensibles a todas las puzolanas en exclusividad, de aquí que algunos investigadores empiecen a denominarles con el apelativo genérico y simple, que denota un todo único, de "la puzolana" o simplemente "puzolana" y con ellos y de igual modo a los cementos puzolánicos y sus buenas propiedades al respecto al decir de muchos, entre ellos Thaspulatov y Glekel (132) los cuales llegaron a generalizarlas de tal modo que contrariamente a lo que se podía creer, era posible usarlas para obtener cementos resistentes a los sulfatos, pese a que la ejecución y puesta en práctica de los mismos seguía mostrando machaconamente, igual incertidumbre, en los resultados, como en origen.

En tal sentido y en el culmen de las generalizaciones, Turriziani y Río (133) recuerdan los resultados de los estudios más recientes llevados a cabo por ellos, sobre la naturaleza de los productos de reacción entre la cal y "la puzolana" y los de la hidratación del clínker portland, en relación con la comprobada resistencia química de los cementos puzolánicos.

Pese a ello y aún en la línea primitiva, seguan obteniéndose resultados por otros investigadores, Polivka y Brown (27), que confirmaban una vez más lo conocido hasta entonces. No obstante sí hemos de hacer notar que a partir de aquí, y una vez que se consiguió calificar a los cementos

portland "de elevada resistencia, o no, a las aguas selenitosas", las puzolanas se empezaron a utilizar en el sentido de averiguar si su presencia junto a aquellos les mejoraba -aumentaba- o empeoraba -disminía-, dicha resistencia sulfática original.

Por aquel entonces Chapelle (134) en Francia, lleva a cabo un completo trabajo en el que tras demostrar, en contra de la opinión generalizada, hasta el momento, que el ataque selenitoso -"sulfo-cálcico" le llama el autor- a las puzolanas, ampliado a las escorias de altohorno, era un hecho constatable, llega a preparar por vez primera mezclas ternarias., cemento-puzolana-escoria, como aconsejó, en su día, Ferrari (135).

Posteriormente Turriziani, Rfo y otros (105) (136) convendrían una vez más, tras sus trabajos, en la influencia altamente positiva, sobre resistencias a los sulfatos, que producían las puzolanas ricas en sílice reactiva añadidas a cemento portland, residiendo en ello, principalmente, la causa de la alta resistencia sulfática de los cementos puzolánicos.

Paralelamente Jambor y Casopis (137) comentaban para mayor confusión, que las adiciones puzolánicas atenúan el proceso de captación de  $SO_3$ , con lo que aumentaban las resistencias, a la acción agresiva, de las mezclas puzolánicas correspondientes.

Por otra parte, Calleja (138) señala que la "combinación consistente en conglomerantes puzolánicos hechos con clínkeres, de por si estables, frente a los agresivos selenitosos, y puzolanas, -lo que en Italia denominábase cementos ferrico-puzolánicos-, es excelente para la consecución del fin que con ellos se persigue", llegando incluso el autor a generalizar que "la personalidad de los cementos puzolánicos, en este aspecto de las ventajas, es tal, que les permite aliarse con otros conglomerantes, que a su vez poseen características propias y excelentes de durabilidad frente a sulfatos (yeso) aguas selenitosas, sumándose sus acciones", basando el autor la explicación de ese buen comportamiento de los cementos puzolánicos en la puzolana presente.

A continuación, Soria también manifestaba en un trabajo premiado (139) que "los cementos puzolánicos y siderúrgicos se consideraban como los conglomerantes sancionados por la práctica como resistentes a las aguas sulfatadas", y de ello el autor se hace partícipe al afirmar siguiendo la línea de Turriziani, Rfo y otros (114, 148) que "su mayor durabilidad, que el portland ordinario, sólo se cumple cuando han tenido lugar los fenómenos secundarios de la hidratación que motivan un desarrollo en el endurecimiento y una formación de fase amorfa tales que impidan la penetración del medio agresivo

en la masa y sus consecuencias destructivas ulteriores".

A la vez M. de Luxán B. (140), partidario del término genérico "puzolana", trataba de demostrar el por qué "La puzolana evita la disgregación del hormigón en terrenos yesíferos" y por ello indica que "a su juicio, la coyunda PAS-PUZOLANA, proporcionaría cementos de alta resistencia a las aguas selenitosas".

De nuevo Calleja (141) en un estudio -también premiado-, más completo y compendiador del tema y siguiendo, en principio, la línea de Tuthill, Bogue, Turriziani, Río, ... etc., señala que "los conglomerantes hidráulicos a base de clínker portland y puzolana altamente rica en sílice reactiva, resisten particularmente, y mejor que otros, los ataques de aguas agresivas naturales"; y en otro pasaje de su trabajo confirmaría de nuevo la ya clásica dicotomía existente en este tema, al referir que "para algunos, la adición de puzolana perjudica a los cementos de contenido elevado de óxido férrico (bajo módulo de fundentes), tales como los cementos Ferrari, Kühl y/o PAS-PUZ españoles, mientras para otros, las puzolanas mejoran incluso la resistencia química de estos cementos", no obstante y para el autor "son en realidad más abundantes y razonables las opiniones que se inclinan, desde el punto de vista de la durabilidad para los sulfatos, por cementos constituidos por buenas puzolanas naturales y clínkeres intrínsecamente resistentes a aguas y suelos selenitosos o sulfatados con lo cual se revalorizan los PAS-PUZ españoles". Por último y finalmente el autor participa de la ya clásica teoría de Ferrari (135) y otros (147) al referir que "las ventajas de las puzolanas en los cementos puzolánicos, residen en la estabilidad de éstos frente a la expansión por sulfatos y en la durabilidad de los mismos frente a ataques por aguas y suelos selenitosos".

Parte de algunos de estos trabajos y conclusiones se encuentran compendiados por I. Biczok (142) en su libro "CORROSION Y PROTECCION DEL HORMIGON", el cual en alguno de los pasajes cuenta al respecto que según W. W. Kind, los cementos puzolánicos (considerados por el autor como un todo único y homogéneo) y siderúrgicos, son totalmente resistentes a las disoluciones de  $\text{CaSO}_4$  y  $\text{MgSO}_4$  de determinada concentración y a las de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  c. lo son también, siempre que contengan una cantidad suficiente -mínimo 25%- de materias ácidas e hidráulicamente activas. Por otra parte, afirma que las investigaciones de cementos portland con bajo contenido de alúmina expuestos a las disoluciones de sulfatos, muestran que la resistencia al ataque sulfático de los cementos portland "sulfatorresis-

tentes" es inferior a la de los cementos puzolánicos y siderúrgicos, aunque superior a la de los portland normales.

Siguiendo en esta línea Mehtay Gjörv (18) encontraron que la adición de trass o puzolana, mejoraba la durabilidad de los hormigones de cemento portland, de aquí que, por parecido motivo, Kind y Kalousek recomendaran que para aplicaciones de resistencia a los sulfatos era de interés la reducción del contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$ , libre o disponible de los cementos portland hidratados mediante la adición de materiales con sílice reactiva tales como las puzolanas, las cuales son capaces de convertir el  $\text{Ca(OH)}_2$  en silicatos cálcicos hidratados, explicando ésto incidentalmente el por qué los cementos portland bajos en  $\text{C}_3\text{A}$ , los cementos puzolánicos y los cementos portland con escoria de altohorno se aconsejen con frecuencia para aplicarlos en hormigones resistentes a los sulfatos.

Por estas fechas, M. P. Luxán (143) transcribe en su tesis doctoral las ventajas de las puzolanas en los cementos puzolánicos dadas anteriormente por Calleja, limitándose la autora únicamente a citar que "el incorporar puzolana al cemento portland tiene como fin principal fijar la cal librada en su hidratación, creando compuestos hidráulicamente insolubles y estables, y aumentando la resistencia tanto mecánica como química del producto resultante", y extendiendo tales generalizaciones a los actuales cementos PA.

Casi al mismo tiempo, K. Mather (144) afirmaría, coincidiendo con los resultados de Turriziani, Río, Celani, Angeletti, etc., que los cementos puzolánicos que resisten elevadísimas concentraciones de sulfatos, similares a las del drástico ensayo de L-A (145), son aquellos cuya puzolana tiene un elevado contenido de sílice reactiva.

Estas y otras parecidas opiniones sobre el tema llegan a hacer que se incluyan en determinados libros de texto (146) nacionales, actualmente en vigor, generalizaciones tales como que "la resistencia química de los cementos puzolánicos se extiende a aguas selenitosas,..."

Y una vez más Calleja (14) en un trabajo posterior incidiría en lo mismo, basándose para ello "en la menor reserva alcalina de las pastas de cemento puzolánico que en relación con la durabilidad hace que los hormigones confeccionados con tales cementos tengan una resistencia notablemente mayor frente a los ataques químicos producidos por aguas puras, ácidas, carbónicas agresivas e incluso selenitosas y marinas...", hasta tal punto que más adelante el autor refiere que los cementos resistentes, en distinta medida, a los ataques por sulfatos pueden ser de varios tipos y clases,

estando dentro de los portland, los de bajo contenido de  $C_3A$  y  $C_4AF$ , pero no siendo, no obstante, los cementos más genuinamente resistentes al ataque por sulfatos, en general, los de tipo portland, sino los que contienen escorias o los puzolánicos, llegando a ser, según el autor, éstos últimos "inclusive eficaces frente a ataques por yesos", de ahí que invitare, al igual que H. de Luxan B., "al técnico encargado de su puesta en obra, a uso y consumo -que ya de por sí tiene una cierta prevención contra el empleo de cementos distintos del portland "puro", unas veces por inercia y otras por temor, no siempre fundado, a fraudes- y a que empleara tanto los siderúrgicos como los puzolánicos "serios"... y "de garantía"... por ser de fiar... para tal fin".

Más tarde K. Mather (147) informaba que unos cementos puzolánicos, resistían más el ataque sulfático que otros, habiendo preparado todos ellos a base de una gama variable de puzolana, en esta caso cenizas volantes, y cementos portland. Por el contrario, Grzymek y colaboradores (148) son abiertos partidarios de los cementos puzolánicos tras sus trabajos al respecto siguiendo la línea, sin proponérselo, de Tuthill, Bogue, Turriziani, etc., de emplear puzolanas con sílice reactiva, tipo diatomita, etc.

Más recientemente Bensted (74) refiere como la resistencia de un cemento portland resistente a los sulfatos, se ve alterada y cambiada de signo y por ende disminuida, al añadirle determinada ceniza volante, con lo que los puzolánicos correspondientes no se comportaban como su portland original.

Y últimamente Samanta y Chatterjee (149) continúan abundando en lo mismo al citar, generalizando, que estudiada ampliamente la química de las puzolans, se ha establecido que la sustitución parcial de cemento portland por puzolana, aumenta la resistencia de los morteros correspondientes al ataque por aguas sulfáticas.

Y ahí no queda el tema pues esta idea llegaría a plasmarse en el Reino Unido como normativa: la SFB, Df, UDC 691.32, DIGEST 90, feb. 1968, BUILDING RESEARCH STATION, Digest 90 (Second Series): "Concrete in Sulphate-Bearing Soils and Groundwaters", Apartado: Tipos de Cemento, que dice: "... la inclusión de puzolana también mejora o aumenta la sulfato-resistencia de los cementos portland ordinarios".

Y tampoco podemos dejar de citar los comentarios de Sorensen (150) a raíz de sus trabajos en esta línea, que indican el efecto beneficioso de las puzolanas, y en particular las artificiales, cenizas volantes, sobre



el comportamiento de los cementos portland ante el ataque sulfático, para acabar generalizando que tales resultados están en la línea de los existentes en la bibliografía sobre la "buena imagen" de que gozan mundialmente los cementos puzolánicos ante el citado ataque agresivo.

Y por último no podíamos dejar de transcribir las opiniones de Bradbury (151) sobre los cementos puzolánicos fabricados con las puzolanas artificiales, cenizas volantes. Este autor reconoce que los cementos puzolánicos no se venden comercialmente como resistentes al ataque sulfático aún cuando se sabe, según el autor, que poseen tales buenas propiedades, anti-sulfatos, y hasta tal punto que, tras sus ensayos, las equipara a las que genuinamente poseen los cementos portland resistentes al ataque de los iones sulfato, PY españoles, siempre y cuando el contenido de iones sulfato del agua agresiva respectiva no exceda del que poseen normalmente las aguas subvalveas correspondientes, superando, por ende, a los portland en todos los casos, no así a los equivalentes PY españoles para el caso de una elevada y normal concentración de iones sulfato en el agua agresiva.

Pensamos pues que estas citas han servido lo suficiente para el fin propuesto: Mostrar con claridad la situación real de esta temática y que a la vista de los trabajos realizados y las conclusiones obtenidas en materia de cementos puzolánicos no es otra que la existencia de dos "frentes"; uno, el mayoritario, a favor, y otro, el minoritario, en contra, del empleo, uso y consumo indiscriminado de los cementos puzolánicos y/o de las puzolanas, sin normativa(s) actual(es) al efecto, frente a las aguas sulfáticas, en general, y selenitosas en particular, basándose para ello normalmente en las conclusiones sobre sus respectivos trabajos muy particulares y casuísticos y/u opiniones personales, generalmente no contrastadas al respecto.

En el caso más numeroso, el de los investigadores "a favor", nacidos, como decíamos, al amparo de los buenos resultados obtenidos con sus puzolanas "particulares" al caso, en especial las eminentemente "silíceas", como ópalos y diatomeas, estos solían extender y generalizar la conclusión del buen comportamiento de éstas al resto de las puzolanas, cual si las mismas se trataran de un "TODO UNICO, HOMOGENEO E INDIVISIBLE"

Por lo cual, todo ello ha dado motivo para estudiar este tema en el presente trabajo, a fin de tratar el mismo de un modo más "causístico" más que "casuístico", es decir, GLOBAL más que PARTICULAR, merced a una hipótesis de trabajo a la que corresponde como veremos un planteamiento generalizado del mismo.

#### IV.5. Generalidades sobre Pozolanas.

##### IV.5.1. Definición(es) y Conceptos. Consecuencias.

A diferencia de como ocurriere en el capítulo III y el apartado IIIyIV.1, correspondientes a Cementos Portland y Cementos Pozolánicos, respectivamente, en este apartado se va a tratar primeramente y con algo de detalle el tema conceptual de estos materiales para proceder a continuación a citar algunos trabajos sobre el comportamiento de los mismos ante un ataque sulfático.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de Cementos, (RC-75), actualmente en vigor en España define a las "Adiciones Hidráulicamente Activas" ó "Adiciones Activas" como los materiales que poseen propiedades hidráulicas latentes, como algunas escorias siderúrgicas, o son capaces de "fijar cal", como las pozolanas. A continuación y de igual modo, define a las "Pozolanas" como sigue:

El producto natural que es capaz de "fijar cal" a la temperatura ambiente, en presencia de agua, formando compuestos con propiedades hidráulicas. Por extensión el término pozolana se aplica también a otros productos naturales o artificiales que tienen propiedades análogas, tales como la tierra de diatomeas, las arcillas calcinadas y las cenizas volantes.

Esta definición dada sobre pozolanas es aceptada, por todos los investigadores, fabricantes y usuarios del ramo, pese a que alguno(s) la maticen más en la forma que en el fondo, para y a continuación, pasar todos a clasificarlas incluyendo siempre entre las mismas el término "NATURALES" ó pozolanas propiamente dichas, y "ARTIFICIALES", entre las cuales las más características son las Cenizas Volantes (CV) y los Productos Arcillosos Calcinados, así como la "Gaize" tostada, el "Moler" cocido, el "Si-Stoff", el "Surkhi", etc.

Igualmente es de destacar la unanimidad existente entre todos ellos sobre:

##### a) La Composición Física:

- determinada sup. espf. alrededor de 4000 unidades Blaine, es decir, generalmente algo mayor que la del cemento portland — que suele ser de alrededor de 2800 a 3500 unidades Blaine —, al que acompañan,
- determinado estado de la materia, tales como, amorfo, vítreo, pseudo-vítreo, zeolítico, pseudo-cristalino y/o cristalino, y sobre todo grado o cuantía de los mismos, generalmente de composición variable, siendo por lo general lo "vítreo", ó "amorfo", ó

"parte más activa", bastante mayor que lo "cristalino", ó "parte menos activa" ó mal llamada "inerte".

b) La Composición Química:

- óxidos ácidos más característicos de las mismas, tales como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y/o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , denominados genérica y acertadamente por algunos investigadores (141) "FACTORES HIDRAULICOS", y cuya variabilidad es, de hecho, notable y real, dándole, en cualquier caso, el típico carácter ácido que poseen.

c) Las Propiedades Específicas:

- "actividad", en mayor o menor grado, siendo este rasgo tan específico y característico de las mismas que muchos minerales arcillosos de igual o similar composición química, carecen de ella, por lo que se puede decir con fundamento que la misma reside más en la estructura inestable de sus componentes (que merced a su unión o enlace químico con otros iones, tales como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ , ... etc, buscan una "ansiada estabilidad termodinámica", coincidente, en la mayoría de los casos, con la de alguno(s) de los componentes hidratados del clínker de cemento portland), que en la sola constitución química de los mismos.

d) El Estudio Científico y Tecnológico:

Pues la necesidad urgente de seguir realizando estudios específicos (152) de algunos de sus aspectos y/o comportamientos, no estudiados todavía, quizás, con el debido y suficiente detalle, minuciosidad y metodología de planteamiento previo, tales, entre otros, como la susceptibilidad de las mismas - bien como tales o bien en sus distintas mezclas posibles normalizadas con cementos portland, resistentes, o no, al ataque de los iones sulfato (en nuestro trabajo circunscritas única y exclusivamente a las proporciones de mezcla normalizadas de los cementos PA y PUZ) -, a la acción de las aguas sulfáticas, en general, y selenitosas en particular, así como también, sus posibles consecuencias tecnológicas, en su caso, para los morteros y hormigones con ellos preparadas, e igualmente para los correspondientes métodos acelerados de ensayo, a preparar, para caracterizarlas.

La razón de la urgencia de dicho estudio, viene dada en el apartado siguiente, siendo este aspecto citado el abordado en este trabajo, como se podrá comprobar más adelante.

En definitiva se puede concluir que:

- 1ª.- Las tres primeras generalidades a), b) y c) se han materializado: entre otras, en algunas normas ó propuestas de norma, nacionales y/o internacionales, tales como:
  - Propuesta de norma UNE: "Toma de muestra y métodos de ensayo de las cenizas volantes como materiales de construcción (153).
  - Norma ASTM C 311-77: "Standard Methods of Sampling, and Testing Fly-Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete" (154).
  - Norma ASTM C 595-76: "Standard Specifications for Blended Hydraulic Cements" (155).
- 2ª.- La actividad de las puzolanas, no sólo es función de un determinado grado de supf. especif., sino también del estado físico-químico de sus componentes químicos, que les confiere un determinado nivel de energía suficiente para reaccionar a temperatura ambiente, con otros iones tales como  $\text{Ca}^{2+}$ , en cuyo caso recibe el nombre concreto de "poder de fijación de  $\text{Ca}^{2+}$ " (ó  $\text{SO}_4^{2-}$ , ó  $\text{CO}_3^{2-}$ , ó  $\text{Cl}$ , etc.), para formar nuevos compuestos cementicios o disruptivos, según casos, bastante insolubles en agua y a través de los cuales alcanzan "su estabilidad energética"; dichos compuestos suelen ser bastante similares a los obtenidos en la hidratación del cemento portland.
- 3ª.- Dentro del mundo de las puzolanas, las naturales y artificiales generalmente se tratan y consideran científica, tecnológica y normativamente, por separado, aunque últimamente y en cuanto a su uso y consumo en la preparación de hormigones y estabilización de suelos, carreteras, etc, están empezando a tener tratamiento común (154) (156), siendo así como se las ha tratado y considerado en este trabajo, en base a lo siguiente: Toda puzolana, posee una parte, generalmente la mayor, amorfa, y otra, generalmente la menor, cristalina. La primera, que es la que más las caracteriza (143), podemos decir que tiene un estado físico que puede ser un compendio de vítreo, gel, pseudo-gel, zeolítico, pseudo-cristalino. etc, siendo precisamente lo cristalino lo que más las diferencia, pues si en las primeras suelen ser minerales más o menos argilizados, tales como, cuarzo, caolinita, augita, magnetita, chabacita, analcina,

herschelita, feldespatos, etc, productos todos ellos que suelen provenir de una más o menos prolongada meteorización de sus vidrios volcánicos originales, las segundas suelen ser silico-aluminatos cristalinos, naturales o no, bastante estables e inatacables por ácidos fuertes y quizás algo menos por bases fuertes, y obtenibles, todos ellos, generalmente por síntesis mediante calentamientos, fusiones y/o recristalizaciones de diverso grado y cuantía, tales como mullita, sillimanita, tridimita, cristobalita, andalucita, disteno o cianita, etc, aunque todos ellos por su cuantía bastante escasa en todas las cenizas volantes es lo que menos las influencia y caracteriza

Por todo lo cual y en especial su parte vítrea, en este trabajo, tanto a las puzolanas naturales como a las artificiales se las ha considerado como un TODO UNICO, siendo única y exclusivamente su composición química, cuali y cuantitativa, y estructural, las que nos las diferenció a la hora de su selección y elección subsiguientes, función de los objetivos perseguidos.

4<sup>a</sup>.- La mayoría de las clasificaciones, excepto la de Verhasselt (157), se basan más en su constitución mineralógica, origen geológico, procedencia o lugar de extracción, que en su constitución química "reactiva", habiendo sido Ferrari (135), Venuat y Papadakis (158), Massazza (159), ASINEL (153), ASTM C 595-76 (155) y ACI (160) los que más se aproximaren, a nuestros planteamientos o fundamentos previos, centrados y concretados principalmente, como veremos, en las puzolanas sílico-aluminosas, y no en las sílico-alumínico-calcáreas, ni en las sulfo-cálcicas, por razones obvias, aunque las conclusiones obtenibles con las primeras sean aplicables en mayor o menor grado a todas ellas. No obstante no hemos de olvidar aquí por su interés y actualidad la obtenida por Verhasselt (157) que tras precisar y definir los parámetros ó "índices de actividad puzolánica" diversos con que las juzgó, a saber:

- a) índice de "actividad puzolánica" (aspecto mecánico), que se define convencionalmente como el aumento de resistencia mecánica a compresión o a tracción,
- b) índice de "reactividad puzolánica" (aspecto químico), que se define convencionalmente como la cantidad de óxido de calcio consumida ó "fijada" según método descrito por el autor, pudiendo ser la "velocidad de fijación de CaO", lenta, media ó rápida,

- c) índice de "eficacia puzolánica" (aspectos mecánico y químico combinados), que se define por la razón a)/o).
- d) índice de "eficacia puzolánica relativa", que se define como la razón de la eficacia puzolánica del material estudiado y la del hidróxido de aluminio considerado como material puzolánico de referencia,

las clasificaría en cuatro clases, del valor cero al tres, según su "índice de cualidad puzolánica", producto de la "eficacia puzolánica relativa media y del consumo de  $\text{CaO}$ ", y cuyos valores extremos, cero y tres serían coincidentes, según el autor, con el  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y el  $\text{SiO}_2$  respectivamente, o bien, en seis clases, del valor cero al cinco, según su "índice de cualidad puzolánica" de resistencias mecánicas a compresión y tracción, los cuales traducidos a ejemplos prácticos de utilización las califica en mediocres, medianas, buenas y muy buenas.

Y a propósito de todo ello, podríamos preguntarnos ¿Y la clasificación que se obtendría en función del distinto grado de susceptibilidad al ataque por los iones sulfato de cada puzolana, con sus posibles consecuencias tecnológicas correspondientes, sería, ó no, totalmente coincidente con la anterior propuesta por Verhasselt?. Este es uno de los muchos objetivos de este trabajo de Tesis Doctoral.

Y volviendo de nuevo a los autores anteriores diremos que mientras:

- el primero las clasifica en:

- . Puzolanas ACIDAS, si  $\% \text{SiO}_2 > 60\%$
- . Puzolanas INTERMEDIAS, si  $50\% < \% \text{SiO}_2 < 60\%$
- . Puzolanas BASICAS, si  $\% \text{SiO}_2 > 40\%$

- el segundo las define cuantitativamente sin mas, como que:

- . la proporción de sílice,  $\text{SiO}_2$ , suele variar del 40% al 80% y
- . la proporción de alúmina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , " " " 10% " 20%.

- el tercero, tras darle mayor rango de variabilidad en composición química, que no en estado físico, a las puzolanas naturales que a las puzolanas artificiales, pasa a englobar, de entre estas últimas, a las silicoaluminosas (pobres en cal libre) dentro de los rangos siguientes:

- . contenido de sílice,  $\text{SiO}_2$ , entre el 48% y el 53%,
- . contenido de alúmina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , entre el 23% y el 28%,
- . contenido de óxido férrico,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , entre el 7% y el 10%, y
- . contenido de cal libre, menor del 3%.

- el cuarto las prescribe a todas ellas para su empleo, uso y consumo en hormigones con la fijación de los siguientes parámetros, entre otros:

. óxido silíceo, aluminico y férrico .....	mínimo .....	70 %
. trióxido de azufre .....	máximo .....	4 %
. pérdida por calcinación .....	máximo .....	12 %

- y el quinto en su apartado 5.3, "Exigencias Químicas", precisa que la puzolana que se vaya a emplear en la preparación y fabricación de cementos puzolánicos de moderada resistencia al ataque de los iones sulfato, contendrá por lo menos 70% de "Factores Hidráulicos", es decir, óxido silíceo, óxido aluminico y óxido férrico respectivamente,

todo lo cual incide para que nosotros y en principio todas las "silicoaluminosas", naturales o artificiales, las clasificáramos, para una mejor selección y elección subsiguiente relacionada con el fin de este trabajo, ateniéndonos solamente a su Constitución Química Porcentual correspondiente, partiendo para ello de la base de que la suma de los "Factores Hidráulicos" sobrepasará siempre el mínimo del 70% exigido para la citada norma norteamericana ASTM C 595-76, así como también que los sumandos de la misma, especial y particularmente, la sílice,  $\text{SiO}_2$ , y la alúmina  $\text{Al}_2\text{O}_3$  variaran notoria e inversamente entre si con lo cual y sin proponérselo, aceptábamos de algún modo la premonición de la ACI (160) en este sentido, así como también la clasificación dada por Calleja (161) y Verhasselt (157), los cuales en un extremo colocan a la "tierra de diatomeas", como producto más hidratado y silíceo, mientras que en el extremo opuesto colocan el "polvo de ladrillo" o "arcilla cocina", como producto más anhidro, y además para Taylor (161) ALUMINICO o que contiene notable cantidad de alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r}}$ , o al menos la suficiente para que le "imprima carácter aluminico" a la misma por su posible y ulterior comportamiento creador de sulfato-aluminatos de calcio hidratados expansivos, o no; y entre ambos, continúa Calleja, se hallan las puzolanas naturales de origen volcánico, pudiéndose añadir también el gran número de artificiales, y entre las cuales se encuentran las sílico-aluminosas, las sílico-aluminico-calcáreas y las sulfo-calcáreas, siendo de mayor interés principalmente las primeras, dado el fin de este trabajo.

En vista de la casuística que a título de ejemplo acabamos de citar, tierra de diatomeas y arcilla cocida, y dentro de ésta más concretamente el caolín calcinado a 700 °C durante dos horas -metacaolín- y enfriado seguidamente de un modo brusco en frigorífico a 0 °C, pasamos, a continuación, a exponer unas generalidades de ambos materiales, elegidos como se verá en su momento, para alcanzar los OBJETIVOS de este trabajo.

#### A) DIATOMEAS

Del latín "diatomeae" y del griego "διατομος", que significa "partido", "cortado en dos partes".

##### 1º.- Generalidades Físico-Químicas (162)(163)(164)(165)(166)

- a) La tierra de diatomeas es una roca sedimentaria, "diatomita" ó "moronita", formada por los caparzones soldados (2 tecas: epiteca e hipoteca), que forman a modo de "coca", ó "cajita" ó "pequeño estuche", el esqueleto vítreo de la diatomea, y que acumulados en los fondos marinos son elevados a la superficie por movimientos orogénicos.
- b) El esqueleto de la diatomea es una malla vítrea regular de paredes de dimensiones microscópicas, algunas menores de  $1\mu$ , soldadas y colocadas similarmente a las celdillas de las abejas, con poros, longitudinales (rafe) y circular (nódulos: central y terminales) por donde se comunica con el exterior.
- c) El componente químico fundamental de ese vidrio es ácido silícico amorfo producido por la deshidratación del ácido silícico gel resultante de la fijación de la diatomea mediante su función vital de crecimiento o reproducción simple o auxosporulación y ulterior cogamia (en Céntricas) o isogamia (en Pennadas). Esta sílice hidratada amorfa finamente dividida puede alcanzar en algunas muestras un contenido del 94% siendo generalmente muy reactiva de aquí su nombre científico y tecnológico de "Sílice reactiva",  $\text{SiO}_2$ . Estas sílice es resistente tanto a la acción de todos los ácidos fuertes mas comunes como a las bases e incluso a la incineración.
- d) De acuerdo con el difractograma de DRX y el termograma de ATD, es un ópalo de composición  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  y %  $\text{H}_2\text{O}$  generalmente menor del 10%, de aquí que dicha sílice hidratada constitutiva de la tierra de diatomeas y el Kieselgur sea amorfa para la DRX aunque no obstante suele poseer esporádicos cristallitos de cristobalita, detectables por DRX, del orden de magnitud de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  cm de tamaño.

##### 2º.- Generalidades Científico-Tecnológicas: Actividad Puzolánica y Mecanismo de Endurecimiento subsiguiente.

Dado que cada puzolana o tipo de ellas o sub-familia de ellas representa un caso particular, al decir de los investigadores, de todo su conjunto, no es posible, al menos por el momento, establecer una teoría general y unitaria acerca de la actividad puzolánica, por ello y en lo que respecta



a la tierra de diatomeas diremos que en el caso de éstas el problema es relativamente sencillo, pues, a pesar de que desde el "moler", con 65% de sílice soluble y 6% de agua de hidratación, hasta el "trípoli" y el "Kieselgur" con cerca de 95% de sílice soluble y 6% de agua, pasando por la "gaize" y la "diatomita", existen diferencias de composición, aunque éstas no son tan grandes, dado, además, el pequeño contenido de sesquióxidos, etc., como para no atribuir razonablemente la actividad puzolánica a la sílice hidratada (conjunto de  $\text{SiO}_2 + \text{nH}_2\text{O}$ , que en estos materiales supone del 70% a cerca del 100%), que se encuentra en ellas en forma, de ópalo ó geiseirita.

Dado también que otros materiales de análogo origen y composición, son inactivos frente a la cal, la actividad de estas puzolanas de origen orgánico no es sólo cuestión de contenido en sílice hidratada, sino también de estado físico de división de la misma. Lo prueba, por una parte, el hecho de que las activas poseen una estructura natural porosa con una gran superficie específica interna, y, por otra, las circunstancias de que ciertos ópalos y basaltos no activos, cobran actividad cuando se molturan a gran finura y se someten a una lixiviación con  $\text{CH}_2\text{N}$  c.(10 N).

A tal efecto cabe señalar aquí que cuando la sílice está hidratada, formando ópalo ó geiseirita, entre otros compuestos, o cuando es amorfa como en ciertas calcedonias no muy antiguas, puede reaccionar en frío con los hidróxidos, es decir que las moléculas, distribuidas inicialmente sin orden, se agrupan formando retículas cristalinas estables. En definitiva, que el ácido silícico de que está formado el ópalo, sólo se combina con otros elementos, para formar los silicatos complejos de los minerales de las rocas, si es reactivo, para lo cual se ha de encontrar en estado "metaestable" ó "lábil", siendo este estado físico una característica connatural de los silicatos en fase vítrea, que es amorfa. Y puesto que cualquier fase vítrea se produce cuando un magma fundido se enfría con mucha rapidez, con el aumento de viscosidad experimentado por tal hecho por la fase líquida, se impide el ordenamiento de los átomos en las moléculas para tomar forma cristalina, cuya ausencia implica la existencia de la amorfa. Por lo tanto y como resumen puede decirse que este estado vítreo es un "equilibrio congelado", por lo que basta la incidencia de una pequeña acción externa -¿la portlandita?, ¿la portlandita y el yeso?- para activar el sistema.

Por otra parte en el estado vítreo la fractura por esfuerzos mecánicos, por ejemplo la trituración de una roca, no se produce en planos de clivaje determinados por el ordenamiento molecular, sino que equivale a una relajación de las fuerzas de enlace químico. Pues bien, al romperse la red molecular

en cualquier punto, por desgarramiento de las largas cadenas de tetraedros de  $\text{SiO}_4^-$ , quedan en los vidrios "ácidos" enlaces libres que enseguida forman gel de sílice. Estos son los puntos reactivos.

Finalmente se puede decir que los ácidos silícicos condensados,  $-\text{SiO}_4^{4-}$ ,  $\text{SiO}_5^{-6}$ ,  $\text{Si}_2\text{O}_7^{-6}$ ,  $\text{Si}_3\text{O}_9^{-6}$ ,  $\text{Si}_4\text{O}_{12}^{-8}$ ,  $\text{Si}_6\text{O}_{17}^{-10}$ ,  $\text{Si}_6\text{O}_{18}^{-12}$ ,  $\text{Si}_8\text{O}_{20}^{-8}$ ,  $(\text{SiO}_3)_x^{-2x}$ ,  $(\text{Si}_2\text{O}_5)_x^{-2x}$  pueden presentarse en los silicatos complejos formando redes tridimensionales o laminares.

No todas las puzolanas de esta procedencia, altas en sílice, tienen la misma actividad, ya que en algunas de ellas se incrementa también sometiendo a calcinación, como sucede con el "moler", la "gaize", las "tierras blancas", todas ellas también muy ligeras y porosas, cuyo análisis microscópico revela cuarzo, feldespatos, micas, mas o menos alterados y/o argilizados, y todos ellos en una matriz amorfa de gel de sílice. Pese a ello, como materiales puzolánicos, todos los citados suelen comportarse tanto mejor cuanto mayor es su contenido en sílice amorfa y menor la proporción de impurezas cristalinas o vítreas de otros constituyentes.

No obstante no se puede limitar la acción puzolánica a la sílice inicialmente soluble, por cuanto su contenido aumenta durante el proceso de endurecimiento, y ello a expensas de lo que en un principio era insoluble, lo que prueba la participación de ésta en la reacción. Esta capacidad reactiva de la sílice no soluble depende de su origen, pues o procede de la descomposición de minerales silicatados, como en el caso de la "gaize", o su procedencia es orgánica, como ocurre con la "diatomita", el "moler", y el "trípoli". En este último caso, por ejemplo, la sílice se encuentra en una red estructural suelta y floja, con defectos reticulares y puntos de mayor energía potencial e inestable, lo cual explica su mayor capacidad de reacción.

En definitiva, y para el caso que nos ocupa, según Lapoujade y Vogelin (1967), los productos de reacción después de un mes, entre la tierra de diatomeas y el  $\text{Ca(OH)}_2$ , son fundamentalmente compuestos tobermorfíticos del tipo I de Taylor (1972), los cuales son también componentes, entre otros, del cemento hidratado. Tales compuestos, formados en este caso, como decimos, a partir de la sílice activada o reactivada de la tierra de diatomeas y el  $\text{Ca(OH)}_2$ , son geles de silicato cálcico hidratado, C-S-H, de composición variable, según la concentración de cal en la fase líquida. Y todo ello porque en el conglomerado de cal y puzolana hay cal en exceso y por tanto, a lo largo de todo el proceso de endurecimiento existe un estado de saturación de cal, siendo de esperar la formación de un gel al que, según las condiciones de equilibrio en el sistema que nos ocupa  $\text{SiO}_2\text{-CaO-H}_2\text{O}$ , le corresponde la compo-

ción  $2\text{SiO}_2 \cdot 3-4\text{CaO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Por el contrario si el sistema fuese pobre en cal o experimentase un empobrecimiento continuo de este compuesto en la fase líquida, se formarían asimismo geles diversos de silicato cálcico hidratado, pero de menor basicidad, a los que probablemente correspondería la composición  $2\text{SiO}_2 \cdot 2-3\text{CaO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , que es lo que sucede comunmente en los cementos puzolánicos.

No obstante estudios mas recientes llevados a cabo por Hara e Inque (168) sobre la formación entre  $70^\circ$  y  $100^\circ\text{C}$  de diversas tobermoritas procedentes de materiales puzolánicos de contenido de sílice reactiva muy dispar, en su reacción con la cal, dieron como resultado la sugerencia de que cada una de las distintas tobermoritas posibles, según su mayor o menor espaciamiento basal (por inclusión de iones  $\text{Al}^{3+}$  en el lugar del  $\text{Si}^{4+}$ ), se pueden considerar como formas diversas bien cristalizadas de C-S-H(I) de diferente relación C/S.

Finalmente se ha de conocer que una característica peculiar de estas puzolanas ricas en sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ , es que pueden producir un cemento de mezcla con alta resistencia química a las aguas naturales agresivas; dicha propiedad, puede atribuirse, principalmente a la formación de una gran cantidad de silicato cálcico hidratado gelatinoso, el cual es, en particular, resistente a tal tipo de agresividad por su baja relación C/S, y una segunda razón es el bajo contenido de alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , pese a todo lo cual y en vista de la gran porosidad, -por su estructura física peculiar, estuches vacíos, y/o su necesaria y elevada relación agua/cemento, a/c-, que las puzolanas altas en su contenido de sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ , (diatomeas, ópalo, etc.), les comunican a sus pastas, morteros u hormigones respectivos, Hansen (110) las calificaría de "peligrosas", no ocurriendo otro tanto con las puzolanas ricas en alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , las cuales el mismo autor las calificaría de "beneficiosas" a condición de que dicha alúmina forme  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  para lo cual la relación (A/S) ha de ser igual a  $\frac{1}{4}$ , ya que o sino tomaba la forma  $\text{C}_3\text{AH}_6$  también perjudicial. No obstante años después Huakun y colaboradores (169), tras sus trabajos, volverían al punto de partida al afirmar que los productos de la hidratación de cenizas volantes calcáreas eran fundamentalmente ettringita recubierta de tobermorita gel protectora.

Por último, véase a continuación por su interés e íntima relación con esta temática, el apartado VIII. 2.1. venidero, pág. 307 y siguiente .

## 5) CAOLIN O CAOLINITA

### 1º.- Generalidades Geológicas:

El caolín es uno de los grupos minerales que componen las arcillas o rocas arcillosas, las cuales se denominan también "pelíticas" y, en general, "lutitas", siendo rocas detríticas en sentido amplio y estando formadas, a diferencia del limo, por partículas de tamaño menor de 0,05 mm, en las que los llamados "minerales de la arcilla", la caolinita, la illita y la montmorillonita, poseen una estructura cristalina diferente aunque formada por estratos sucesivos de tetraedros de sílice y octaedros de alúmina, los cuales forman, aproximadamente un tercio de su composición. En general estos minerales son capaces de absorber cantidades variables de agua, volviéndose entonces plásticos, lo cual constituye una de sus propiedades físicas mas notables, tornándose, en cambio, compactos por desecación.

En general se puede decir que las rocas arcillosas son el primer resultado de la alteración superficial de otras rocas pre-existentes, generalmente rocas ricas en feldespatos, que contenían minerales aluminicos en cantidades considerables. Según fuere el lugar donde se depositen, ya sea el de su origen o diferente, dan lugar a los depósitos de arcillas "residuales" ó "sedimentarias" respectivamente, siendo este último caso una precipitación de partículas coloidales en suspensión acuosa, la cual se puede acelerar considerablemente por la presencia en la misma de sales disueltas.

Desde el punto de vista mineralógico, las arcillas son rocas de gran complejidad, pues en una misma muestra suelen coexistir por lo general varios minerales arcillosos. Por otra parte el tamaño tan reducido de sus partículas minerales hace difícil o imposible su diagnóstico por los métodos microscópicos ordinarios, y por ello hay que recurrir para determinarlos a técnicas instrumentales apropiadas: curvas de pérdida de peso por calentamiento o deshidratación controlada, dilatometrías, DRX, IR, ATD, ATG, DTG, ME, etc.

### 2º.- Generalidades Físico-Químicas:

La composición química de estas rocas es muy compleja, predominando en ellas, el  $\text{Si}^{4+}$ , bien formando parte de los minerales de la arcilla, bien como cuarzo detrítico, o de diversos silicatos detríticos. Asimismo, el catión  $\text{Al}^{3+}$ , forma también parte principal de los minerales de la arcilla así como de los feldespatos detríticos originarios.

La relación S/A, es un índice característico de los minerales de la arcilla y depende del "grado de descomposición" de los feldespatos originarios,

lo cual, a su vez, es índice del "grado de madurez" de la lutita.

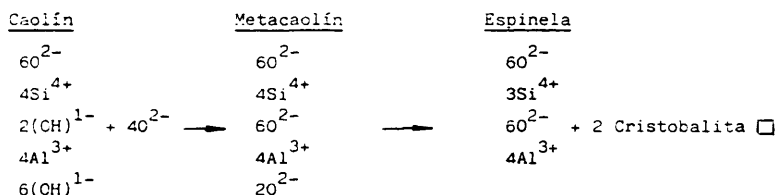
Junto a sus características propiedades plásticas, que acabamos de citar, está su variada "metamorfosis" cristalográfica en función de un tratamiento térmico programado, que origina, en ocasiones, nuevos compuestos, mas o menos cristalinos, los cuales suelen conservar poco o nada de su estructura cristalográfica original. Precisamente y puesto que de todos los grupos minerales arcillosos que existen, sólo nos interesa, por su trascendencia para este trabajo, el caolín,  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{S}_2\text{AH}_2$ , diremos que por calentamiento adecuado del mismo se puede obtener METACAOLIN ó METACAOLINITA ó METANAKRITA ó ANDHIDRIDO CAOLINICO,  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{S}_2\text{A}$ , el cual es un producto intermedio artificial resultante de la deshidroxilación (pérdida de grupos  $\text{OH}^-$  de la red cristalina) térmica adecuada (165)(166) (calentamiento en el rango de temperaturas  $600^\circ$  a  $800^\circ\text{C}$ ) de aquél. Dicha deshidroxilación comienza a unos  $550^\circ\text{C}$  pudiendo alcanzar su campo de verificación total a la temperatura de  $900^\circ\text{C}$ , yendo acompañada tal transformación de cambios de solubilidad de las arcillas en CLH y FH (164). Y el mecanismo de tales procesos se puede explicar gracias a las actuales técnicas modernas, como sigue:

En el proceso de deshidroxilación del caolín el cual es posterior al de pérdida de humedad ( $\approx$  hasta  $120^\circ\text{C}$ ) constituida principalmente por el agua higroscópica y adsorbida, el agua coloidal y el agua de hidratación, y la absorbida en poros y canalículos, el agua combinada o de cristalización, o sea, integrante de la estructura cristalina de estos minerales, se pierde por activación térmica de los grupos hidroxilo integrantes de la red cristalina del mismo merced al aumento de la energía de vibración que se les imparte para poder salir de la misma, de tal modo que alcanzado el valor o grado de agitación térmica suficiente, un protón  $\text{H}^+$ , puede separarse de un grupo  $\text{OH}^-$  y emigrar hacia otro  $\text{OH}^-$  mas o menos anexo, produciéndose así entrambos una molécula  $\text{H}_2\text{O}$  la cual seguidamente se separa de la red cristalina dejando en su "huida" un anión oxígeno,  $\text{O}^{2-}$ , en el lugar de los  $2\text{OH}^-$  originales, dependiendo siempre de la temperatura a la que se produce esta deshidroxilación de la afinidad de la forma catiónica unida a los grupos y de sus fuerzas de unión,  $-\text{OH}^- + -\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{O}^{2-}$ . Cuando el agua de la deshidroxilación se ha extraído de la red original de la caolinita, el producto final no cambia drásticamente sus posiciones espaciales de grupos catiónicos y oxígenos, de modo y manera que adopta una estructura de tipo transicional que es la llamada METACAOLIN, la cual aún continúa conservando un cierto orden estructural cristalográfico, o mejor "memoria cristalina", de su progenitor, el

caolín -(164)-. Investigado en profundidad dicho estadio transicional por muchos investigadores, éstos no están aún de acuerdo en adscribirle una estructura concreta pues si bien:

- Brindley y Nakahira (166) son partidarios de una estructura en la que los cationes  $Al^{3+}$  y  $Si^{4+}$  mantienen sus posiciones reticulares respectivas pero co-ordinadas con el oxígeno de una manera distinta,
- Taylor (166) es partidario de que el oxígeno tiene una disposición específica estando unido al azar con los cationes  $Al^{3+}$  y  $Si^{4+}$ , considerando además que la migración del protón,  $H^+$ , del H-OH, en busca de grupo(s)  $OH^-$  es un carácter esencial de la estructura, y
- Freund (166) ha manifestado que la estructura del metacaolín debe contener una elevada concentración de defectos reticulares aparejados con la coordinación tetraédrica del aluminio, de aquí que no se puede adscribir una estructura fija, determinada y definida a dicha fase.

Pese a todo lo cual en lo que si se está de común acuerdo es en que dicha nueva fase indefinida, conserva bastante de la orientación cristalográfica original de la caolinita matriz (164), es decir, conserva algo de la "memoria cristalina", ya aludida, recibiendo este hecho en terminología mineralógica el nombre de "Transformación TCPOLOGICA", ó "Reacción TCPOQUIMICA" en cuya estructura los Al y Si ocupan posiciones reticulares de tal modo que aquella es marginalmente diferente que la que debiera ser para la  $\gamma-Al_2O_3$ , según la DRX, por ello Brindley y Nakahira han propuesto el siguiente cambio esquemático:



afirmando dichos autores que la espinela se desarrolla a los 980 °C, pero que, de hecho, el defecto cristalino de la misma se puede detectar a temperaturas mucho mas bajas si la velocidad de calentamiento es lenta, pero que por el contrario el estadio final del proceso de calentamiento, formación de mullita, es debido a la migración catiónica, conservándose por ello totalmente la orientación de las capas.

No obstante Jaffe (166) basándose en los experimentos de reactividad química, ha formulado algunos principios diferentes mediante la evidencia

- 2 -

mostrada por la combinación química y la DRX, de modo que acepta la idea de que el metacaolín posee enlaces fijos Si-O-Al aunque mucho más débiles que los del caolín original, de aquí que el aluminio puede lixivarse (ataques ácido-básicos diversos) completamente de esta fase.

Pese a ello, otros autores (165) afirman que los productos sólidos resultantes están virtualmente como una mezcla íntima de componentes en forma de óxidos.

Resumiendo pues, podemos decir que la pérdida de agua del caolín por calentamiento del mismo, entre 600°-800° C principalmente, lo que produce es una fuerte dislocación de los átomos en sus moléculas, pero sin que éstas pierdan TOTALMENTE su "fisonomía" como tales, de modo que lo que se origina es una "modificación amorfa" del caolín ó "meta-fase" del caolín ó "metacaolín". Cuando se continúa el calentamiento del metacaolín, entre el rango de temperaturas 500°-900° C, la energía térmica tiende a romper los ya debilitados enlaces Si-O-Al de aquél, y cuando esto llega a ocurrir se puede formar cierta  $\gamma$ -Alúmina,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, cuya cantidad puede ser aún mayor si el calentamiento ha sido lento y prolongado, por ejemplo, 100 horas a 800° C; por el contrario, y según Jafé (166), la máxima activación del proceso de transformación se puede conseguir en muestras sometidas a ciclos rápidos de calentamiento, debido según el autor, a un nuevo reordenamiento de los enlaces con nuevos ángulos causa por la que a temperaturas por encima de los 920° C tiende a formarse mullita, dado que a tales temperaturas el enlace Si-O-Al del metacaolín sería muy inestable, hecho éste que no ocurre con la mullita, la cual termodinámicamente tiende a formarse con preferencia a  $\gamma$ -Alúmina con estructura de espinela, habiéndose notado que si se formaba mucha  $\gamma$ -Alúmina a temperaturas de calentamiento intermedias, la mullita no se presentaba por debajo de 980° C y la curva correspondiente de ATD no mostró pico exotérmico alguno a 950° C. El fuerte pico exotérmico a 950° C típico de la kaolinita, sólo se produce, si la muestra se calentaba con la suficiente rapidez para así evitar la formación de cantidades apreciables de  $\gamma$ -Alúmina. De aquí que la disociación y ruptura de los muy débiles enlaces del metacaolín sería la mullita la fase natural inmediata que se formase.

No obstante y pese a todo ello recientemente S. Moya (295) ha descubierto mediante RMN que la  $Al_2O_3^-$  (del metacaolín en este caso) está en forma pentacoordinada con el oxígeno.

En conclusión, el metacaolín consiste pues y entre otras cosas, en una estructura "amorfa" ó "rebajada" que en cierto modo, aún puede considerarse como "combinación" ó "unión" (aunque débil) entre la sílice y la alúmina, la cual se encuentra pentacoordinada con el oxígeno, y cuya actividad es la que se aprovecha para este trabajo.

3º.- Generalidades Científico-Tecnológicas. Actividad puzolánica y Mecanismo de Endurecimiento subsiguiente.

Como es natural de las distintas fases mas o menos cristalinas por las que pasa el caolín a lo largo de todo el proceso del tratamiento térmico anteriormente aludido, se ha de fijar la atención de nuevo en aquella en la que se elimina el agua unida químicamente a su molécula, deshidroxilación, integrada, como decíamos, por el agua de "cristalización" estable a los 105 °C y que en general se suele eliminar en el rango de temperaturas entre 500-600 °C y mas concretamente entre 560°-680°-700 °C, quedando siempre unas últimas o mínimas porciones de dicha agua que se desprende a veces a temperaturas muy superiores a los 600 °C.

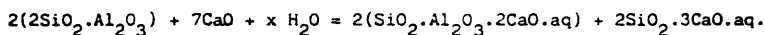
Pues bien, en el caso del enfrentamiento del metacaolín a la cal en un medio húmedo, existen diferencias notables entre su "capacidad de adsorción" (físicamente) y su "capacidad de fijación" de cal (químicamente), en función de las temperaturas máximas que produzcan resultados óptimos en uno u otro aspecto, siendo pues la de 500 °C la que da lugar a la máxima adsorción, y la de 500-700 °C la que da lugar a la máxima fijación de cal; por el contrario los calentamientos del caolín a temperaturas superiores (> 900 °C) originan productos de actividad puzolánica y propiedades hidráulicas escasas (170)(171).

Esta formación de posibles y múltiples compuestos cálcicos a partir del metacaolín ha originado también un vasto campo de investigación. Así por ejemplo Turriziani y S-hippa (172) tras unos estudios llevados a cabo al efecto, mediante las técnicas de DRX y ATD, confirman la presencia del silicato I de Taylor ( $1-1,5 \text{ CaOSiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) y del compuesto de Strätling (sílico-aluminato de calcio hidratado,  $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ), demostrando además que en determinadas condiciones de temperatura (42 °C) se formaba preferentemente aluminato tricálcico exahidrato,  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , el cual adoptaba la forma cúbica con algo de sílice, cuando el contenido en calcio del medio superaba el 55%, y en pequeña cantidad el compuesto de Strätling, pasando rapidamente en condiciones normales dicho aluminato a ettringita si existía además en el medio el yeso necesario y suficiente para ello.

Por otra parte Ormsley y Bolz (173) empleando las mismas técnicas que los anteriores pero esta vez sobre el sistema "caolín-cal-agua", determinaría únicamente la presencia de CSH (I) y/o CSH (II), coincidentes en casi todo con los que pueden provenir de la hidratación del cemento portland, y siendo los causantes, según los autores, de la ganancia de resistencias mecánicas de los mismos.



También Calleja (141) refirió que merced a las técnicas analíticas citadas, las hipótesis de los distintos investigadores oscilan entre admitir la formación de un aluminato de calcio hidratado, la de un silicato de calcio hidratado o la de un sílico-aluminato de calcio hidratado, con o sin carácter zeolítico, no obstante la DRX ha revelado, según el autor, que los compuestos, correspondientes al equilibrio de la reacción metacaolín con hidróxido cálcico en disolución saturada de este último, son el disilicato tricalcico hidratado  $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{aq}$  y el sílico-aluminato bicálcico hidratado  $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaO} \cdot \text{aq}$ , según un esquema de reacción que puede representarse así:



concluyendo finalmente con que la interacción arcillas activadas  $\longleftrightarrow$  cal hidratada, es un proceso lento que se verifica en tres fases:

- en la primera fase, se forma una disolución saturada de cal,
- en la segunda fase, tiene lugar un proceso de "adsorción" de hidróxido cálcico por la arcilla activada, en este caso el metacaolín, y
- en la tercera y última fase se verifica una reacción netamente química entre el metacaolín y la cal (pensamos que la adsorbida principalmente), que puede expresarse mediante el esquema precedente.

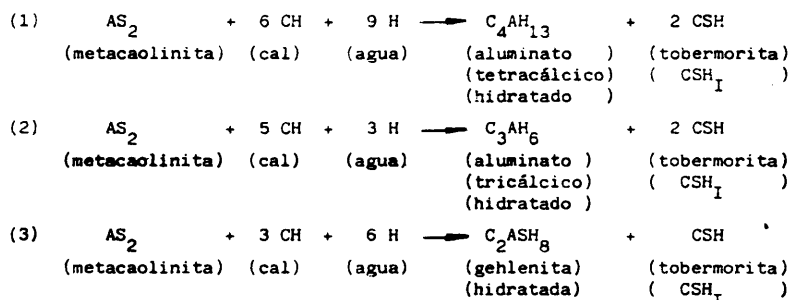
Estas ideas aplicadas a todo el vasto conjunto de las puzolanas y sus productos de reacción con la cal en medio acuoso hacen que el autor reconozca la dificultad de su interpretación y muy particularmente en las fases que contienen alúmina ya que su composición varía muy probablemente:

- (a).- con la relación global sílice/alúmina en la puzolana,
- (b).- con dicha relación referida al vidrio,
- (c).- con el contenido de éste,
- (d).- con la presencia o ausencia de álcalis,
- (e).- en caso de estar éstos presentes, con su proporción en el sistema reaccionante,
- (f).- con la cantidad de fase líquida,
- (g).- con la concentración de cal en ella,
- (h).- con la temperatura,
- (i).- etc., etc., etc.

pese a todo lo cual y a juicio de Calleja, parece ser que, de las dos fases aluminicas predominantes y mas en litigio,  $\text{C}_4\text{AH}_x$  y  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  (gehlenita), la primera, hexagonal y que a alta temperatura pasa a  $\text{C}_3\text{AH}_6$  cúbica, se forma preferentemente a partir de puzolanas con vidrio escaso en alúmina y de zeolitas analcíticas, y en medios concentrados en cal, en tanto que la segunda,

dudosa, se forma de preferencia con concentraciones de cal menores, aunque en todo caso las proporciones relativas de una y otra forma dependerán de la concentración de cal, así la formación de  $C_2ASH_8$  a bajas relaciones agua/puzolana puede ser debida a una disminución de la concentración de la cal en la fase líquida en tales condiciones, a causa de la fuerte basicidad producida por los álcalis liberados. En el caso del caolín, cita el autor, que la fase predominante es  $C_2ASH_8$ , aún en presencia de cal en exceso lo cual no explica su ausencia en los morteros puzolánicos a temperatura ordinaria y la razón, según el autor, puede ser de tipo físico por la dificultad de difusión de iones calcio en un medio con escasa fase líquida muy concentrada en álcalis, lo cual impide los procesos normales de disolución y cristalización. También, parece formarse el aluminato cúbico  $C_3AH_6$  estable a concentraciones de cal de 1,08 gramos por litro, pues por encima de dichas concentraciones se forma el  $C_4AH_{13}$  pseudohexagonal.

También Murat y Comel (174) estudian el sistema metacaolín - $Ca(OH)_2$  - agua en distintas condiciones, relacionadas todas ellas con el mundo del cemento, tales como, condiciones de curado, relación agua/sólidos, relación metacaolín/ $Ca(OH)_2$ , empleo o no de arena, y su influencia en procesos de fraguado, endurecimiento y subsiguiente ganancia de resistencias mecánicas, empleando las técnicas de DRX y ATD para identificar los hidratos formados causantes de los resultados tecnológicos que obtuvo, y como consecuencia de los mismos confirmará la presencia de los siguientes:  $C_2ASH_8$  (gehlenita) y CSH tipo I, con pequeñas cantidades de  $C_4AH_{13}$ , con lo cual, según los autores, sería posible proponer tales reacciones de hidratación "competitivas" ó "simultáneas":



habiendo sido las relaciones en peso de  $AS_2/CH$  respectivamente 0,5, 0,6 y 1,0, y necesitándose por lo menos 1 mol, ó mas, de  $Ca(OH)_2$  por cada mol de metacaolinita para obtener, con el 100% de hidratación teórica, todos los hidratos citados en tales reacciones, aunque respecto a la tobermorita, ésta bien

podría ser del tipo I ó II de Taylor (161). No obstante tanto el tamaño de grano, como el estado de cristalización original y sus impurezas, o no, acompañantes, pueden influir en la consecución, o no, de buenos resultados finales.

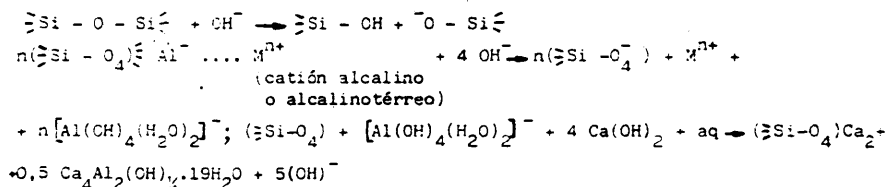
No obstante pese a que el curso de la reacción del caolín activado, sugiere que tanto la estructura (166), como la composición de la fase reactiva pueden ser importantes pese a que la relación sílice/alúmina, es más alta en el metacaolín que en el  $C_2ASH_8$ , este último es el producto predominante que contiene alúmina en todas las condiciones de reacción, incluso cuando existe exceso de  $Ca(OH)_2$ . No obstante estas consideraciones no explican por que no se forma  $C_2ASH_8$  en morteros curados a temperatura ambiente, lo cual bien pudiera estar relacionado con el mecanismo implicado en su formación.

Y concretándonos única y exclusivamente a la parte aluminica  $Al_2O_3^{r-}$  del metacaolín y de todas las puzolanas en general, parece ser según Calleja que al igual que ocurriera con la parte silícica,  $SiC_2^{r-}$ , los compuestos que se pueden formar dependen bastante del contenido de cal del sistema, así si éste es rico en cal se formará  $Al_2O_3 \cdot 3CaO.aq$ , y si es pobre,  $Al_2O_3 \cdot 2CaO.aq$ , para y finalmente terminar transformándose ambos en el  $Al_2O_3 \cdot 3CaO \cdot 6H_2O$ .

Por nuestra parte diremos que estas últimas conclusiones se deben de ajustar con más precisión a lo que hipotéticamente debe ocurrir tras el tratamiento térmico del caolín a  $700^\circ C$  durante dos horas y subsiguiente ataque básico de la portlandita merced a la reacción puzolánica, y es que su estructura cristalina descompuesta tras el calentamiento programado citado, da pie a pensar en la probable existencia de que los "únicos subproductos resultantes" son los referidos por Murat y Comel tras sus trabajos, en los cuales los cationes respectivos silicio y aluminio, correspondiéndose a formas más o menos conjuntas de  $SiO_4H_3^-$  y  $AlO_4H_4^-$  respectivamente, como veremos más adelante, necesitan protones para su neutralización los cuales les pueden ser fácilmente aportados, bien por los cationes  $H^+$  del  $H_2O$  (caso de rehidratación), bien por cationes alcalinos y/o alcalino-térreos, en particular el  $Ca^{2+}$  para el caso que nos ocupa, y cuya fuerza de atracción puede ser tal que acabe por separarlos e individualizarlos en mayor o menor grado en sus formas cálcicas respectivas, constituyendo ésto último el principio fundamental del mecanismo de reacción puzolánica, el cual lo explicaría más adelante Dron (175) mediante un proceso gráfico hipotético verificable (en tres etapas, ataque, difusión y cristalización subsiguiente de los hidratos respectivos formados), con feldespatos en un medio portlandítico y por ende quizás extrapolable en cierta medida a aquellos otros materiales de composición

físico-química más o menos análoga, como es el caso de las puzolanas. Este autor daría también una hipótesis adicional para el caso de las escorias de alto horno (176), como materiales más cercanos, en cuanto a su composición física, y por ende y en cierto modo algo afines con las puzolanas; e igualmente y por otro lado Way y Cole (177) lo harían para el caso de rocas silico-aluminosas como materiales más alejados, en cuanto a su composición física, de las puzolanas.

Algunas de las hipótesis citadas sobre los diversos modos de activación, incluido el básico de la portlandita, y actuación cementante subsiguiente mediante la correspondiente fijación de cal (reacción puzolánica) se puede representar según Way y Cole (177) por algunas posibles reacciones tales como



No obstante y aún aceptando la no separación individualizada de los tetraedros de  $\text{Al}^{3+}$ , coordinación 4, (termodinámicamente inestables), quizás octaedros (coordinación 6) con exceso de carga negativa (termodinámicamente inestables), o bien tetraedros de origen octaédrico, por ataque básico de la portlandita a la red del caolín previamente distorsionada y rota por el calor, parece evidente que tal separación se debe de producir de hecho rápidamente por la inmediatez de sus resultados, y si en el medio existe además  $\text{CaSO}_4$ , en forma de anhidrita, hemihidrato o yeso, necesario y suficiente para dar ettringita, tales resultados con formación mayoritaria de esta última se obtienen con mas rapidez como se ha confirmado siempre en todos los casos de puzolanas naturales o artificiales, con contenidos apreciables de cantidades de alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^r$ , en su composición y constitución química, y de los cuales se hablará más adelante con algo mas de detalle.

No obstante, lo que si es necesario recordar para este trabajo, es que como se sabe, la cantidad de  $\text{Al}_2\text{O}_3^r$ , de un metacaolín muy puro, no suele superar el 2,10%, estando comunmente en tal caso, de elevada pureza, alrededor del 2,08%.

IV.5.2.- Alúmina Reactiva de las Puzolanas: Formación de Sulfato-Aluminatos de Calcio Hidratados.

Desde que Mecke (178), Ferrari (179), Malquori, Sasso (180), Spadano (181), Parravano, Cagliotti (182) y Budnikow (183), entre otros, demostraran y/o confirmaran la formación directa de sulfato-aluminatos de calcio hidratados a partir de puzolanas mezcladas con yeso, y todo ello en disolución de  $\text{Ca(OH)}_2$ , hasta nuestros días, infinidad de autores han desarrollado sus investigaciones en este campo. De todo ello cabe señalar algo, por su interés e influencia para este trabajo:

- a) desde un punto de vista científico: Jones (51)(52), Kalousek (53)(54), D'Arby Eick (55), Eitel (56), etc., etc.,
- b) desde un punto de vista tecnológico:
  - b.1.- por acción CONSTRUCTIVA, debido a la formación de ettringita "primaria", "colmatadora" y "beneficiosa": Klein, Troxell, Mikhailov, Lossier, Cagnot, Kalousek, Fukuda, Moore y en especial Mateusek, Sauman (184), El-Didamony y colaboradores (117), y Kurdowsky y Thiel (185), por su relativa y especial afinidad con este trabajo,
  - b.2.- por acción CONSTRUCTIVA-DESTRUCTIVA, debido en primer lugar a la formación de ettringita "primaria" y en segundo lugar y algo mas tarde de ettringita "secundaria", ó "disruptiva", ó "perjudicial": Mehta y Polivka (186),
  - b.3.- Por acción DESTRUCTIVA, debido a la formación de ettringita "primaria" motivo y origen, entre otros, de este trabajo: Swayze (27), Polivka, Brown (27), Hansen (101), y un largo etc., que se ampliará en los apartados siguientes, y
- c) desde un punto de vista científico-tecnológico: Chappelle (134), del cual se hablará en el apartado IV.5.4.

Y entrando en algo mas de detalle se puede decir que de los primeros, en un principio y particularmente Eitel porque tras compendiar lo de los anteriores (51)(52)(53)(54)(55), viene a demostrarnos con su trabajo la existencia de un diagrama de cristalización metaestable y posteriormente estable, Figs. 2 y 3, para el sistema  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  a 20 °C, cuyos componentes tienen la capacidad real, según las concentraciones de los mismos, de poder dar, entre otros, los compuestos  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hidrogel, ettringita, hexahidrato, etc., siendo la formación de ettringita por esta vía la que mas interesa para este trabajo. De los componentes de dicho sistema,

el  $\text{CaSO}_4$  se puede proporcionar, bien por la adición de yeso o por el aporte de disoluciones selenitosas, mientras el resto de los componentes lo puede ser, en mayor o menor grado, por los distintos constituyentes mineralógicos de los cementos, P, PY, PA, PUZ, PHA, PS, SS, etc.

Igualmente y desde un punto de vista algo mas práctico, cabe señalar también a López Ruiz (130) que comentaría al respecto que "en presencia de agua de cal, la puzolana fija sulfato cálcico en cantidad directamente proporcional al contenido de alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^r$ , de la misma, atribuyendo tal fijación unicamente a la formación de un "sulfato-silicato-aluminato de calcio hidratado".

Otros investigadores coetáneos del anterior, tales como Turriziani y Schippa (187), estudiando por DRX y ATD, cuali y semicuantitativamente, el sistema "puzolana de Segni-Cal-Yeso" en medio acuoso, obtuvieron, como resultado que durante la reacción, el sulfato de calcio queda fijado por la alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^r$ , de la puzolana en forma de ettringita, así como que esta reacción se completaba en pocos días.

Por otra parte Tasnulator y Glekel (132), confirmaron la existencia de indicios definidos, claros y concretos, de reacciones habidas entre la alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^r$ , de las arcillas cocidas, el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el yeso en medio acuoso con formación de cantidades adicionales de sulfato-aluminatos de calcio hidratados.

Poco después, Rfo, Celani y Angeletti (136) confirmaron una vez más, que con las aguas sulfáticas pueden reaccionar no sólo los aluminatos del clínker, sino también aquellos otros que se puedan originar de la misma puzolana.

Igualmente Calleja (141) comentaría al respecto que estas posibles reacciones de formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados darían en primer lugar y con gran rapidez ettringita, para una vez consumido el yeso, formarse Fase AFm como producto final, y si el sistema fuese pobre en yeso se forma además  $\text{C}_2\text{AH}_x$  pero no  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  (133)(181)(188), aunque otros autores (180)(182) admiten tal formación.

Igualmente Soria (139) comentaría que en severos ataques por los sulfatos, no se puede olvidar, entre otras cosas, la reactividad de la alúmina presente en casi todas las puzolanas naturales y artificiales que puede conducir a la formación de ettringita expansiva. Esto sería admitido posteriormente por Calleja (141) al comentar que en cuanto al contenido de alúmina de las puzolanas, las especies hidráulicas que este compuesto forma dependen también

del contenido de cal del sistema de tal modo que si éste es rico en cal, se formaría  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{aq}$  y si es pobre  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CaO} \cdot \text{aq}$ , transformándose ambos finalmente en  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  estable, no obstante y en el caso particular del "Si-Stoff", que además de contener cantidades apreciables de aluminio, "en estado reactivo especial", contiene también azufre, se forma simultáneamente, sulfato cálcico,  $\text{CaSO}_4$ , y "sulfato-aluminato cálcico hidratado",  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{XCaSO}_4 \cdot \text{aq}$ .

Paralelamente y en el extranjero Menta y Gjörv (18) reconocen que los constituyentes aluminosos de puzolanas y escorias, pueden reaccionar, si son atacados por disoluciones de muy elevada concentración de sulfatos, para formar sulfato-aluminatos de calcio hidratados.

A idénticos resultados llegarían por otra parte R. Mather (147), Gibergues y colaboradores (189) y Grutzeck y colaboradores (190), pero empleando en este caso una ceniza volante calcarea como fuente de alúmina, aunque realmente el campo de posibilidades de formación de tales compuestos, lo ampliarían por un lado, Van Aardt y Visser (191) al demostrar que un feldespató o algún otro mineral conteniendo alúmina cuando se pone en medio acuoso con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  forma, a distintas temperaturas, hidratos del  $\text{C}_4\text{A}$  e hidrogranatos, para a continuación y en presencia de  $\text{CaSO}_4$  formarse ettringita, y por otro Braga Reis (192) al emplear como fuente de alúmina para igual fin la fracción feldespática de un granito.

Finalmente y aún en nuestros días, dada la trascendencia del tema, algunos investigadores como Samanta y Chatterjee (149) sugieren que en presencia de puzolana la Fase AFm se forma antes que la ettringita. A su vez Eitel (156) hace notar que la velocidad de tales reacciones de formación de ettringita varía de unos materiales a otros, siendo ALTA con materiales particularmente activados -metacaolín- y BAJA en sistemas en los que la difusión de los reactivos se hace lenta a través de capas superficiales que puedan impedir la citada difusión; en definitiva, la velocidad de la reacción para formar ettringita dependerá del grado de libertad de los aluminatos para llegar a los huecos donde junto a iones sulfato pueda originarla. Por otro lado también conviene resaltar el hecho puesto de manifiesto por D'Ans y Sick, así como también por Eitel, de que para que tenga lugar la reacción entre los aluminatos y el  $\text{CaSO}_4$  en un medio portlandítico para dar ettringita, no es indispensable una alta concentración de hidróxido de calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , en el medio.

Y de los segundos, porque en base a todas las posibilidades señaladas anteriormente de formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados así

como las diversas velocidades de formación de los mismos, las acciones resultantes pueden ser como decíamos, CONSTRUCTIVA, CONSTRUCTIVO-DESTRUCTIVAS ó DESTRUCTIVAS, interesándonos de todas ellas lógicamente las últimas, aunque no obstante y pese a su aparente desconexión, vamos a citar alguna(s) de las primeras por estar también de algún modo, relacionadas con este trabajo.

Así pues y desde el punto de vista tecnológico de acción CONSTRUCTIVA, sinónimo de cementos expansivos, cabe señalar que desde la década de los cincuenta hasta nuestros días se han venido sucediendo una serie ininterrumpida de trabajos (más fuera que dentro de nuestras fronteras), en los que se trata de aprovechar, para autopretensado químico, el efecto expansivo inherente a la formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados, merced al control del mismo a la hora de su utilización y puesta en práctica. A tal efecto cabe señalar en primer lugar a Matousek y Sauman (184) los cuales basándose en el aluminato monocálcico como principal constituyente "aluminico" del cemento expansivo tipo M\* de Mehta y Polivka (186) y su producto final tras el fraguado, tratan de proporcionarlo a partir de la alúmina reactiva,  $Al_2O_3^{\bar{r}}$ , del metacaolín colocado en un medio portlandítico para que con una proporción determinada de yeso pase a ettringita. No obstante este trabajo sería comentado ampliamente y a la vez por Mehta (193) y Chatterjee (98) por la vertiente de su estequiometría, la cual, según Mehta, daba pie a la formación final de Fase  $AF_m$  y no de ettringita, para finalmente ser replicado por los autores (194), en tal sentido, pero no en cambio en cuanto al objetivo.

En esta misma línea El-Didamony y colaboradores (117) prepararían más tarde, un crudo de clínker expansivo, empleando caolín como materia prima "aluminica", con lo cual y a diferencia de los anteriores obtuvieron el componente expansivo anhidro  $C_4A_3\bar{S}$ , componente fundamental de los cementos expansivos tipo K.

Posteriormente Kurdowski y Thiel (185) obtendrían lo mismo pero en este caso partiendo de una ceniza volante con un "alto contenido de alúmina", como materia prima "aluminica" sin reseñar los autores si tal alúmina era, o no, reactiva.

Y el comportamiento de estos tres tipos de cementos expansivos ante el ataque sulfático, acción tecnológica CONSTRUCTIVO-DESTRUCTIVA, vendría a ser, por sus orígenes, tan variado como en el caso de los portland aunque por razones adicionales algo distintas. Tales razones teóricas del peor comportamiento de los cementos M y S, ante dicho ataque agresivo, las dieron Mehta y Polivka (186) basándose para ello en la constitución química de cada tipo de cemento expansivo, K, M ó S, y comparando, en cada caso, la



cantidad de alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r}}$ , y/o aluminato tricálcico,  $\text{C}_3\text{A}$ , respectivamente, "sobrante" o aún disponible, tras el fraguado y posterior endurecimiento de los mismos (siendo, como era de prever, mayor en el M y el S, que en el K), por poder formar tales cantidades "sobrantes", según las condiciones del medio, o bien ettringita "secundaria" o "disruptiva", o bien Fase AFm, a expensas de ettringita "primaria", ó "no disruptiva" típica en esta clase de cementos.

Pero no obstante no hemos de olvidar que lo más relacionado con este trabajo lo constituye la acción tecnológica DESTRUCTIVA, pues la propiedad, entre otras, ya reseñada de que las puzolanas puedan originar ettringita, daría pie a que Swayze en su discusión (27) sobre este tema con Polivka y Brown (27), allá por 1958, resaltara documentadamente la "indefinida propiedad" ó "inadecuado apelativo" que, desde hacía bastante tiempo, se les venía asignando a los materiales puzolánicos de que "...aumentan la resistencia de los cementos al ataque por los sulfatos....", propiedad ésta, con la que no se encontraba en absoluto de acuerdo dicho autor ya que la gran disparidad de resultados obtenidos hasta el momento era debido a que sus autores respectivos "no habían tenido en cuenta la cantidad de alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r}}$ , que generalmente acompaña, entre otros, a la sílice y óxido de hierro, en todos estos tipos de materiales "sílico-alumínicos". Dicha alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r}}$ , según el autor, al amparo de la definición del comportamiento de estos materiales "que se combinan con la cal (a veces llamada erróneamente "cal libre") procedente de la hidratación del cemento portland", no sólo posee esta capacidad, al igual que la sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^{\text{r}}$ , y el óxido de hierro reactivo,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{r}}$ , sino que además si ésta reacción ocurre en medio sulfático, es capaz de originar compuestos similares a los producidos en la hidratación del  $\text{C}_3\text{A}$  en dicho medio, los cuales pueden dar al traste con el buen comportamiento "sulfato-resistente" del cemento portland resistente al ataque de los sulfatos, al que acompañen".

Y a propósito de ello se ha de decir obligadamente que aquí en España, diez años después (1966), tales ideas de Swayze así como sus fundamentos eran comportados sin proponérselo por J.L. Alonso Ramírez (291), el cual en su memoria de tesis doctoral (presentada en la Facultad de Ciencias, Sec. Químicas, de la Univ. de Madrid, en marzo de 1966, premiada en 1967 con el premio extraordinario a la mejor tesis doctoral de 1966 y publicada en 1969 por el Lab. Central de Ensayos de Mat. de Contr., actual CEDEX), tras llevar a cabo un estudio físico-químico completísimo de doce cenizas volantes (no en cambio y del mismo modo del cemento portland que empleó), y deducir de su estudio bibliográfico (sin poner citas bibliográficas existentes al respecto, que justificarían sobradamente su deducción) que "para conseguir cementos portland-cenizas dotados de buna resistencia a los sulfatos, habremos de buscar tres condiciones fundamentales:

- 1\*) La utilización de cenizas con la menor cantidad posible de alúmina reactiva.
- 2\*) El empleo de cenizas con elevada proporción de sílice reactiva.
- 3\*) Uso de un cemento portland o de un clinker con bajo contenido de aluminato tricálcico ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$ ).

(en cierta medida, tales condiciones serían re-actualizadas aproximadamente diez años después, en 1976, por Calleja, sin citar a su vez a dicho autor, - y por entonces Director del presente trabajo de Tesis Doctoral -, el cual las publicaría un año más tarde (206) ).

No obstante de ambos autores, Alonso y Calleja, el primero llega a recomendar al respecto en el estudio bibliográfico de su memoria de tesis que "sería conveniente realizar series de ensayos de durabilidad, rompiendo probetas a edades determinadas y efectuando, al mismo tiempo, un análisis difractométrico de las muestras hidratadas", para seguidamente a la hora de llevar a cabo la escasa parte experimental correspondiente de su trabajo, elegir extrañamente, tan sólo dos de las doce cenizas volantes estudiadas por el autor, de contenido de  $\text{SiO}_2$  (63,90% y 56,95%, respectivamente), y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (23,84% y 22,78%, respectivamente), bastante aproximados, y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (3,83% y 9,26%, respectivamente) relativamente aproximados, con lo cual dicho autor, alejándose de sus consejos anteriores deducidos como decimos por bibliografía, viene a confirmar,

- su desinterés por esta temática tan concreta (pese a la gran importancia de la misma para España, como quedó demostrado en el Cap. III, INTRODUCCION de esta memoria de tesis doctoral y que dicho autor también recogiera en la suya), y

- su lejanía de los planteamientos, objetivos y fundamentos de nuestro presente trabajo de Tesis Doctoral y en definitiva de dicha temática anterior, hasta el punto de que de la escasa experimentación que realizó concluye generalizando al respecto que: "Todos los conglomerantes mixtos preparados, cualquiera que fuese el origen de las cenizas, (cuando tan sólo empleó dos de las doce estudiadas, la nº 6 y la nº 12, en los ensayos de RS que llevó a cabo), cumplen ampliamente los requisitos exigidos a los cementos portland por el pliego de condiciones en lo que se refiere a finura, fraguado y estabilidad de volumen. Cabe destacar por su importancia que dichas mezclas presentan una resistencia química frente a la acción de las aguas selenitosas considerablemente superior a la que normalmente tiene el cemento portland",

lo cual no concuerda íntegramente, como se podrá comprobar, con los resultados obtenidos en este trabajo de tesis doctoral.

Pero todo ello no acaba ahí, pues dos años más tarde (1968) Barba Solana en su memoria de Tesis Doctoral (152) (realizada en el Lab. Central de Ensayos de Mat. de Constr., y no premiada en esta ocasión) y más concretamente en su estudio bibliográfico referente a la resistencia al ataque del sulfato cálcico, dice al respecto que de los trabajos de Anstett y Turriciani y Rio, así como del ensayo de Florentin "se pueden conseguir cementos resistentes a los sulfatos, aún empleando clinkers altos en  $C_3S$ , si la puzolana que se adiciona es buena, tiene razón sílice/alúmina activas suficientemente alta, en total acuerdo con los resultados de A. Celani, M. Collepari y A. Rio", para seguidamente en su parte experimental correspondiente obviar esta temática tan precisa y a nuestro juicio tan importante y necesaria para España, de aquí que en el capítulo de RECOMENDACIONES volviera a decir (como anteriormente Alonso Ramírez):

"C) Estudiar la resistencia a los sulfatos de las pastas de cementos puzolánicos, en función de las propiedades fundamentales de las adiciones" (que el autor al parecer, y desde un punto de vista estrictamente químico, denomina - a diferencia de Verhasselt (157) - como "actividad", "tenacidad" y "capacidad" puzolánica, proponiendo ensayos a propósito para determinarlas)

No obstante y pese a todo ello y sobre todo a tan excelsos trabajos experimentales realizados únicamente por Alonso Ramírez y Barba Solana, continuábase sin esclarecer el verdadero y auténtico "carácter" de una puzolana, es decir, el determinar por medios sencillos, ágiles, rápidos, fiables y económicos, su intencionalidad de comportamiento y con ella su utilidad más adecuada, en calidad y cantidad precisas, para cada caso concreto. De aquí que Calleja,

extrañamente, escribiera un artículo en la revista Materiales de Construcción n.ºs. 190 - 191 titulado "Adiciones y Cementos con Adiciones" (292), en el cual el autor tras decir que "En todo caso sería interesante disponer de un procedimiento, a ser posible normalizado y generalmente aceptado, para determinar a priori la mayor o menor actividad (relativa) de un material puzolánico, sin perjuicio de un ensayo de puzolanidad del cemento correspondiente como producto final" comenta seguidamente que, "La conclusión de que, por ejemplo, con una buena ceniza - o puzolana, o escoria - se saca relativamente mejor partido de un cemento (clinker) peor que de otro mejor y recíprocamente, y que, en consecuencia, no vale la pena seleccionar clínkeres especiales o cuando menos de mejor calidad para una Adición dada, es engañosa. Si bien puede ser parcialmente cierta en cuanto a las resistencias mecánicas a plazo largo, sucede lo contrario en lo que se refiere a las resistencias a edades cortas, verdadero caballo de batalla en el problema de las adiciones, como se verá a continuación", y que

- "En suma, hay que contar siempre con una resistencia algo menor a corto plazo de los cementos portland con adiciones, en relación con los cementos portland ordinarios equivalentes, hasta el punto de que administraciones como la norteamericana, al tiempo que recomienda el uso de cementos portland con adiciones, indican la necesidad - y llaman la atención sobre ello - de ampliar en la cuantía oportuna las medidas de curado y los plazos de desencofrado" ...

"En este sentido, la vuelta atrás de la situación real presente y futura previsible en todo el mundo, renunciando a las adiciones, será, en todo o en parte, muy difícil, por no decir imposible. Otras deberán ser las soluciones; por ejemplo, actuando sobre los componentes de los "nuevos cementos": el propio clinker y las adiciones, buscando la máxima calidad en ambos y la mejor adecuación entre ellos, y optimizando sus proporciones"

(con lo cual este autor comienza a apartarse de sus posiciones iniciales respecto a esta temática, recuérdese a propósito el trabajo titulado "Las Puzolanas", 2º premio Luxán (141) y otros muchos afines del mismo autor desde antes y entonces hasta el presente) para finalmente en el apartado dedicado expresamente en dicho artículo por el mismo al Futuro Previsible, llegar a la conclusión de que en general las tendencias de cara al futuro apuntarán hacia la sustitución total de los cementos portland tradicionales por los cementos portland con adiciones, con lo cual reconoce el autor la necesidad de un "iv - avance extenso y profundo en el conocimiento científico más detallado de todas estas adiciones (se refiere el autor a las puzolanas - naturales y artificiales - los fillers y las escorias siderúrgicas principalmente) y

de los cementos que las contienen así como en el desarrollo tecnológico de la fabricación y utilización de los mismos;

- como consecuencia, establecimiento de criterios de idoneidad y calidad, e implantación de métodos para evaluarlas y controlarlas, tanto en lo que se refiere a las adiciones en si como en lo que concierne a los cementos;
- como detalle de lo que precede, estudio de métodos, normalizables o no, para determinar cuantitativamente la exigencia de agua y la capacidad de retención de la misma por parte de los cementos, .....;
- elaboración de recomendaciones oficiales por parte de las Administraciones, tendentes a la difusión del empleo de los cementos con adiciones, así como de instrucciones para su utilización mas racional y eficaz, señalando con detalle los usos específicos de cada uno; y
- en el terreno internacional, intentos de creación de una Norma de gran ámbito y con tal carácter, que armonice y homologue los cementos con adiciones de los distintos países", y
- en el apartado dedicado por el mismo a RECOMENDACIONES, y en el que a los fabricantes de cemento se refiere, recomendar entre otras cosas,
  - "I) Seleccionar y controlar las adiciones y el clinker, y experimentar previamente los cementos antes de su lanzamiento al mercado,
  - II) Optimizar las proporciones de mezcla, clinker y adiciones, y el contenido de yeso de los cementos"

. y en el que a los usuarios se refiere, recomendar entre otras cosas,

- "I) Utilizar racionalmente los cementos con adiciones, teniendo en cuenta lo que se puede y debe esperar de ellos y lo que no se les puede exigir,
- II) Dosificar estos cementos en las proporciones adecuadas, según las resistencias de los hormigones que haya que preparar".

Y volviendo de nuevo a Swayze se ha de decir que algunos años después Hansen (110) refería al respecto que "un cemento que cumpla las especificaciones ASTM para los cementos resistentes al ataque de los sulfatos, no mejora por adición de una puzolana, adición que, incluso, puede ocasionar un perjuicio debido a un aumento de la porosidad ó a la presencia de fases aluminicas que dan lugar a reacciones con los sulfatos".

Algunas de las posibles consecuencias tecnológicas nacidas, bien al amparo de los supuestos respectivos de Swayze (27) y Hansen, acabados de citar, bien al amparo del tratamiento conjunto, científico-tecnológico, del problema en cuestión, por Chapelle, se verán a través de una numerosa y detallada casuística de ensayos programados intencionadamente para tratar de confirmar o no tales supuestos, los cuales se verán en los capítulos venideros.

Por otra parte no hemos de olvidar que este apartado, por las citas tan específicas que incluye, y sus fines, sobre el metacaolín y el caolín, no deja de estar relacionado, de algún modo, con el apartado IV.5 que trata sobre las generalidades de las puzolanas y con los medios o materiales que se emplearán a propósito en este trabajo para alcanzar, como decimos, los objetivos del mismo, que se verán mas adelante.

Finalmente no queda mas que constatar que la formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados a partir de la alúmina reactiva,  $Al_2O_3^r$ , de las puzolanas, es un hecho que habrá que tener muy en cuenta como se verá en su momento, y que para el caso expuesto del metacaolín aprovechase su formación para preparar cementos expansivos, mediante dosificaciones adecuadas del mismo, entre otros, creadas al efecto, pero ¿Qué pasará con dicha probable formación de ettringita en las dosificaciones normalizadas de los cementos españoles PA y/o PUZ, cuando se utilice para su preparación, tal tipo, o similar en mayor o menor grado, de puzolana "aluminica" (según Calleja y Taylor) ?, sin olvidar tampoco aquella otra ettringita de origen  $C_3A$  de la fracción portland que acompañare a tal tipo de puzolana. Por lo tanto, un primer paso, será el confirmar la formación ó no, de ambos tipos de ettringita de orígenes y etiologías diferentes, lo cual constituirá como veremos en su momento, la Parte Operatoria Previa, POP, de este trabajo.

(1\*) NOTA.- Constituyentes "aluminicos" de cada tipo de cemento expansivo, según Mehta (91).

Tipo de Cemento Expansivo	Constituyente "aluminico Fundamental"
K	$C_4A_3\bar{S}$ (clinker de cemento expansivo) (posee también clinker portland bajo en $C_3A$ )
M	$C_4A$ (posible subproducto cálcico anhidro de origen)
S	$C_3A$ (de clinker portland alto en $C_3A$ )

IV.5.3.- Acción Positiva (+), Negativa (-) ó Nula (0) de las Adiciones Puzolánicas, ó no, en la Resistencia de los Cementos Portland ante el Ataque de los Iones Sulfato. Casos Prácticos.

Como se dijo en la INTRODUCCION y podemos comprobar, el tema DURABILIDAD DE LOS HORMIGONES y mas concretamente de su pasta cementante ante el ataque de los iones sulfato, es uno de los mas densos, estudiados, practicados y debatidos, aún hoy día, dentro del contexto de los conglomerantes hidráulicos, de tal modo que los trabajos publicados son tan cuantiosos (3)(4) que la necesidad de escogerlos, por su mayor representatividad, y resumirlos se hizo imprescindible, siendo la Tabla 9 la consecuencia de tal labor.

De igual modo conviene volver a resaltar que las sustituciones mas ó menos "silícicas" empleadas por cada autor se eligieron con el único y exclusivo motivo de tratar de sustituir físicamente la mayor parte posible de cemento portland y con él su fracción  $C_3A$  que es la mas susceptible al ataque de los iones sulfato.

A la vista de la Tabla 9, parece ser que desde el punto de vista de la resistencia al ataque de los iones sulfato:

1ª.- Los resultados de todos estos estudios indican que algunas puzolanas aumentan significativamente la resistencia al ataque de los iones sulfato de aquellos cementos que, sin tal adición, presentan un mal comportamiento en los ensayos de laboratorio. Por el contrario tiene poca influencia, si tienen alguna, con los cementos que, de por sí, ya presentan altas resistencias al ataque de los iones sulfato; incluso en algunas ocasiones las puzolanas han producido efectos contraproducentes.

En definitiva que con casi todas las puzolanas la casuística "favorable-desfavorable", "aumentan-disminuyen", "mejoran-empeoran", "buenas-malas", etc., ..., es muy grande lo cual origina una mayor desconfianza e incertidumbre para el que las ha de utilizar.

2ª.- Es de destacar que pese a lo dicho en el punto anterior, el mayor número de casos, salvo raras excepciones, de mejoría y/o aumento de resistencia al ataque de los iones sulfato de todos los cementos, P y/o PY, ha recaído sobre aquellas puzolanas que poseen un elevado contenido de "sílice reactiva",  $SiO_2^r$ , es decir, aquellas que según Ferrari (135) merecen el calificativo de "ácidas" porque su contenido en tal constituyente es superior al 60% en peso, y según Taylor (161) y Calleja (141) de "silícicas". No obstante y desgraciadamente algunos investigadores, al amparo de que todas las puzolanas poseen tal constituyente en mayor o menor cuantía, hacen extensible esta buena propiedad, exclusiva, al parecer, de la familia "silícica", al resto de las puzolanas.

3ª.- Algunos autores al amparo de los resultados que obtienen, "postulan" lo que creen o piensan que debe de ser el proceso físico-químico "protector, ó no", de las puzolanas, sin demostración práctica alguna. Tales postulados y otros más se verán con algo mas de detalle en el apartado III.6.3.

### TABLA 9

ACCION POSITIVA(ALT) NEGATIVA(BAJA) O NULA(MEDIANA) DE LAS ADICIONES,PUZOLANAS O NO, EN LA RESISTENCIA DE LOS CEMENTOS PORTLAND P&P PUROS AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO.

No	Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor	ESTADO DE INGRESOS										Observaciones	
						RENTAS											
						Impuesto	Contribuyente	Periodo	Fecha	Importe	Importe	Importe	Importe	Importe	Importe		Importe
1	0001	Impuesto sobre el Valor Añadido	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
2	0002	Impuesto sobre el Consumo	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
3	0003	Impuesto sobre el Comercio Exterior	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
4	0004	Impuesto sobre el Ingreso	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
5	0005	Impuesto sobre el Patrimonio	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
6	0006	Impuesto sobre el Consumo	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
7	0007	Impuesto sobre el Comercio Exterior	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
8	0008	Impuesto sobre el Ingreso	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
9	0009	Impuesto sobre el Patrimonio	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
10	0010	Impuesto sobre el Consumo	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
11	0011	Impuesto sobre el Comercio Exterior	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
12	0012	Impuesto sobre el Ingreso	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
13	0013	Impuesto sobre el Patrimonio	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
14	0014	Impuesto sobre el Consumo	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
15	0015	Impuesto sobre el Comercio Exterior	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
16	0016	Impuesto sobre el Ingreso	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
17	0017	Impuesto sobre el Patrimonio	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
18	0018	Impuesto sobre el Consumo	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
19	0019	Impuesto sobre el Comercio Exterior	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
20	0020	Impuesto sobre el Ingreso	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
21	0021	Impuesto sobre el Patrimonio	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
22	0022	Impuesto sobre el Consumo	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
23	0023	Impuesto sobre el Comercio Exterior	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
24	0024	Impuesto sobre el Ingreso	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
25	0025	Impuesto sobre el Patrimonio	1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
26	0026	Impuesto sobre el Consumo	100														



#### IV.5.4.- Efecto Protector ó "Anti-Sulfato" de las Puzolanas a los Cementos

##### Portland: Causas Probables y Discrepancias Posibles.

El creciente desarrollo mundial de los cementos con puzolanas debido al problema energético así como también a los buenos resultados que han obtenido algunos notables investigadores del ramo, en la aplicación de tales conglomerantes, no ha ido acompañado por un avance paralelo en nuestros conocimientos sobre el mecanismo de la acción puzolánica y su efecto protector "anti-sulfatos" (al decir de aquéllos), correspondiente.

Por esta razón el estudio de las transformaciones a través de las cuales el cemento portland asociado con la puzolana, se hace resistente al ataque químico de las aguas agresivas naturales, particularmente para España y por razones obvias, las selenitosas, constituye todavía un problema de notable interés, no solo tecnológico, sino también científico, por sus indudables trascendencias económicas y sociales, que a nivel mundial pueden tener estos tipos de conglomerantes hidráulicos. De aquí que Higginson y Glantz (129) y después Kalousek y colaboradores (35) y mas recientemente Mehta (198) comentaran que: "Aún no se conoce el mecanismo exacto por el cual las reacciones puzolánicas contribuyen a las resistencias mecánicas y sulfáticas (durabilidad) de morteros y hormigones".

De todo lo cual y a continuación, se van a detallar las distintas hipótesis existentes hasta nuestros días, las cuales tratan de dar una posible explicación a la creencia generalizada del efecto protector de las puzolanas -resistencia potencial al ataque de los iones sulfato ó efecto "anti-sulfato"- en los cementos puzolánicos.

Así Lafuma (68) sugiere que la combinación entre un compuesto hidratado insoluble del cemento en el estado sólido y una sustancia en disolución origina siempre expansión, pero si el compuesto del cemento pasa a la disolución, reacciona y luego precipita, no se produce expansión; en otras palabras, cuando la solubilidad del compuesto reaccionante del cemento es muy pequeña, los productos de reacción se producen "in situ" y los cristales formados ejercen un empuje contra los sólidos de su alrededor, por el contrario cuando la solubilidad es mayor, hay cierta difusión y los productos de reacción se depositan en los espacios libres disponibles. Es sabido igualmente que la solubilidad del aluminato tetracálcico hidratado es muy pequeña en disoluciones saturadas de cal, y la del exahidrato cúbico lo es también hasta en disoluciones de cal medio saturadas, por ello la fijación de la cal por reacción con la puzolana da compuestos que están en presencia de disoluciones

con pequeña concentración en cal y por tanto se producen las condiciones señaladas por Lafuma para que la formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados no sea expansiva.

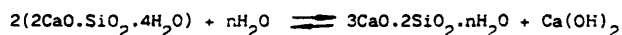
Posteriormente Blondiau (199) aportaría una experiencia, a nuestro juicio no definitiva, en favor de esta teoría, a saber: Un cemento puzolánico complementamente hidratado, en el que la concentración de cal es aproximadamente 0,89 g. CaO/l, se le amasa con yeso, según el ensayo L-A (145) que veremos con mas detalle mas adelante, y sólo se origina una pequeña expansión, ocurriendo todo lo contrario, en condiciones similares, pero con el cemento puzolánico anhidro.

A continuación Steopoe (200) propondría que los silicatos y aluminatos de calcio hidratados formados por la puzolana y la cal se descomponen por acciones químicas agresivas, liberando cal y formando finalmente geles de sílice y/o alúmina inertes, mas estables y capaces de engendrar resistencias.

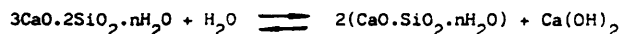
Bastantes años más tarde, Flint y Well (201), proponían la teoría de que ello se debe, como en el caso de la sustitución del  $C_3A$  por  $C_2AF$ , ó de  $C_3A$  cristalino por fase vítrea o de mayor tiempo de curado, a la formación de hidrogranates que contienen cal, sílice, alúmina y óxido férrico, y que son de por sí resistentes. Para Franklin, y en el caso de las puzolanas, le parece raro, pero Thorvaldson (28) lo admite con caracter general.

Después López Ruiz (130) daría mas de una explicación al respecto, así tenemos:

1ª explicación: Al silicato bicálcico hidratado con agua y  $pH < 11,74$  le ocurre:



y si se continúa la disolución, a un pH de 11,55 hay otro paso de hidrólisis:



y el silicato monocálcico, a su vez, cuando se alcanza un pH de 7, tiende a descomponerse en  $Ca(OH)_2$  y  $SiO_2$ . De todo lo cual se deduce, según el autor, que "la reacción del  $Ca(OH)_2$  libre, con la sílice y la alúmina, sólo en el caso de que formen algún compuesto desconocido estable sílico-alumínico-cálcico, podría interpretar o dar una explicación a la resistencia de los cementos puzolánicos frente a los citados agresivos. De otra forma hay que admitir, y es lo mas probable, a juicio del autor, que la estabilidad se

deba a las condiciones especiales que concurren en la formación de los compuestos cálcicos".

2ª explicación: Es muy probable que en la estabilidad de los cementos puzolánicos desempeñe un papel esencial la mayor compacidad del producto fraguado.

No obstante y a pesar de todo ello, "el autor reconoce que con estas explicaciones no se da una razón exacta y por ende satisfactoria de la resistencia que las puzolanas le confieren a los cementos puzolánicos a las aguas - selenitosas". Pese a todo lo cual y tras admitir sólo parcialmente la teoría de Lafuma, concluye el autor, en que es muy probable que en el ataque por los sulfatos la formación de "sulfoaluminato", pueda considerarse como la primera causa de la destrucción y entonces la influencia de la puzolana podría atribuirse:

- ya a la formación de una superficie protectora de compuestos puzolana-cal,
- ya a la formación de geles por y para la descomposición de los "sulfoaluminatos",
- ya al modo de formarse el "sulfoaluminato" como sugería Lafuma.

Después Bogue (5) señala que el sulfato-aluminato de calcio hidratado se forma más rápidamente en disolución de alta concentración de  $\text{Ca(OH)}_2$  y ya que la desintegración de los cementos en disoluciones sulfáticas es debida principalmente a la formación de aquella sal, la presencia de " $\text{SiO}_2$  activa", según el autor, retardará la formación del sulfato-aluminato, retrasándose y evitándose con ello la desintegración de la estructura de hormigón de cemento portland.

Paralelamente Tuthill (131) indicaría que lo propuesto por Bogue implica que la "Sílice Activa" ó "Puzolana", según el autor, sean útiles para reducir la severidad del ataque sulfático al combinarse ambas con  $\text{Ca(OH)}_2$  y formar compuestos más insolubles.

A continuación Turriziani y Río (133) mencionan que la resistencia a los sulfatos de los cementos puzolánicos es debida al modo particular de conformación estructural de la pasta de cemento puzolánico (teoría de la acción impeditora de los geles de neoformación provenientes de la puzolana y la cal), coaligada, en calidad y cantidad, de cualquier modo, a la presencia de la sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ , en la partícula vítrea del material puzolánico, es decir, que al parecer, la "calidad" del gel protector es función de una determinada "cantidad" presente de sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ , que en palabras de los autores significa que dicho efecto protector de la puzolana reside,

o bien en la menor cantidad de "alúmina solubilizable" de la puzolana por parte del  $\text{Ca(OH)}_2$  en presencia de  $\text{SiO}_2^{\text{F-}}$  ó bien en la menor "sulfatación" de los aluminatos presentes en cada caso, por el impedimento que a tal fin suponen los geles y su "calidad" en función de la "cantidad" de  $\text{SiO}_2^{\text{F-}}$ , como dijimos anteriormente.

Un año después Chapelle (134) demuestra la posibilidad real de ataque "sulfo-cálcico" de minerales silico-alumínicos. Para que dicho ataque tenga lugar con disolución previa del mineral atacado, es necesario que la coordinación del Al sea 4, por el contrario cuando dicha coordinación del Al es 6 el ataque "sulfo-cálcico" del material se produce sin disolución previa y los morteros fabricados son atacados y destruidos. Finalmente y cuando la coordinación del Al es 4 y 6, el autor no pudo establecer reglas precisas que correlacionen la estabilidad e inalterabilidad del material y las condiciones en las que se opera según el citado ataque "sulfo-cálcico".

Así mismo este autor refiere que la cal necesaria en el ataque "sulfo-cálcico" puede:

- a) estar presente bajo la forma de  $\text{Ca(OH)}_2$ ,
- b) resultar de una reacción de hidratación de los silicatos de calcio anhidros del cemento portland,
- c) estar presente total o parcialmente bajo forma amorfa no ionizable (ejemplo: escoria de alto horno),

No obstante, y al decir del autor, en el supuesto de este último caso, el ataque "sulfo-cálcico" disminuye de intensidad, de tal manera que:

- a) Los silicatos conteniendo aluminio en coordinación 4 no son atacados,
- b) idem, en coordinación 4 y 6 son atacados con disolución previa del mineral,
- c) idem, en coordinación 6 son atacados sin disolución previa.

Seguidamente Polivka y Brown (27) recomiendan, al igual que Barba (162) en España diez años después, la necesidad de hacer un estudio físico-químico del mecanismo por el cual las puzolanas mejoran, entre otros, la resistencia de los cementos portland al ataque de los sulfatos.

Posteriormente Malquori (202) expondría su punto de vista al respecto, que a juicio de Calleja (141) es el más completo, para lo cual por una parte considera que la tobermorita formada por reacción puzolánica tiene una relación C/S menor que la del cemento portland y que, además, por su carácter de pseudogel, rellena los microporos de la pasta y recubre y protege las fases vulnerables al ataque, impartiendo ambos hechos mayor compacidad, impermeabilidad y durabilidad a los conglomerantes; y por otra parte considera que,

si bien las puzolanas no son específicamente resistentes a los sulfatos, como dejan menos cal sin combinar, hacen fallar las condiciones favorables para la formación y estabilidad de los "sulfo-aluminatos" expansivos y con ello confieren indirectamente a la pasta una mayor resistencia al ataque por sulfatos.

De nuevo Turriziani y Río (196), participando en mayor o menor grado de esta idea anterior de Malquori, afirman que la distinta "cantidad" de geles de silicatos de calcio hidratados con distinta estructura y composición, da lugar a una diferente distribución de fases, en la cual ven estos autores la razón de la mayor durabilidad de los cementos puzolánicos frente a los portland, puesto que consideran que no existen apenas diferencias cualitativas entre ambos tipos de cementos que pudieran servir de explicación. Igualmente estos autores para explicar la mayor resistencia química y el mejor comportamiento de los cementos puzolánicos hechos a base de clínker de baja relación A/F y de puzolanas muy ricas en sílice frente a disoluciones agresivas de sulfatos, se basan también en la protección que confieren las puzolanas al cemento sometido a la acción de las aguas selenitosas, que explican, por una acción de recubrimiento por compuestos de puzolana-cal o por geles hidratados procedentes de la descomposición de vidrios compuestos, cuya acción se ejerce sobre los constituyentes vulnerables al ataque. Tales recubrimientos son los que impiden la difusión iónica y las reacciones de intercambio entre las fases de la pasta y las disoluciones agresivas; del mismo modo les ha servido para explicar la no equivalencia entre la alúmina (se puede decir que muy activada) del clínker, generalmente en forma de  $C_3A$  en su mayor parte, y la alúmina reactiva,  $Al_2O_3^r$ , de la puzolana en cuanto a la susceptibilidad de las pastas de cemento puzolánico frente a los sulfatos, fenómeno que mas adelante confirmaría experimentalmente Kurdowski (203) con los cementos expansivos.

Esta falta de equivalencia no se puede explicar suponiendo que la alúmina de la puzolana no da lugar a  $C_4AH_{13}$  pues este hidrato se forma de hecho.

Para dichos autores, ambas explicaciones residen en que las puzolanas, ricas en sílice, ésta y la alúmina, se encuentran muy entremezcladas en el vidrio, de manera que los productos de reacción alúmina-cal se forman, en medio de los productos de reacción sílice-cal, protegidos por éstos que son mas abundantes.

Por tanto y en definitiva parece que la resistencia química de los cementos puzolánicos, a juicio de estos autores, puede depender, aparte de la mayor o menor facilidad por otros conceptos, de la cantidad y naturaleza

("calidad") de la fase vítrea de las puzolanas y de la relación S/A activas de los cementos, debiendo ser el valor de dicha relación próximo a 6 para que los mismos puedan resistir el severo ensayo de L-A (145) de modo comparable a como lo hacen los cementos aluminosos y sobresulfatados.

Seguidamente Río, Celani y Angeletti (136) como consecuencia de los trabajos realizados llegan a las siguientes conclusiones:

- 1ª) tanto el cemento portland como el puzolánico, hidratados, tienen parecida e incluso la misma composición química,
- 2ª) el cemento portland hidratado tiene mas  $\text{Ca(OH)}_2$  que el correspondiente puzolánico,
- 3ª) ésto hace que al parecer la tobermorita del cemento portland está rodeada por una disolución saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  y la del puzolánico no,
- 4ª) todo ello no justifica el distinto comportamiento, en la práctica, de los dos cementos citados, portland y puzolánico,
- 5ª) de donde se deduce que probablemente la mayor resistencia química de los cementos puzolánicos dependa no sólo de las distintas fases presentes en las pastas hidratadas, sino también de una distinta proporción cuantitativa, que da a la pasta dura una particular estructura resistente.

Esta última conclusión, al decir de los autores, viene confirmada por lo investigado al respecto para terminar probando que la causa principal de la especial resistencia química de las pastas puzolánicas según ellos, se debe a la mayor impermeabilidad y sobre todo a la notable acción protectora que sobre las fases presentes ejercen los geles neoformados, obstaculizando la difusión de los iones y los intercambios con la disoluciones de contacto. No obstante y aún siendo, como dicen los autores, la resistencia química función de los geles neoformados, reconocen los mismos, tras una investigación complementaria, que:

- 1ª) La sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ , ejerce una buena y notable influencia para que los cementos puzolánicos correspondientes sean resistentes al yeso.
- 2ª) La sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ , (de la puzolana que ellos emplearon), presenta, al reaccionar con  $\text{Ca(OH)}_2$ , una velocidad de reacción netamente superior a la correspondiente de la alúmina reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , con el fin de impedir ó al menos reducir sensiblemente la solubilización de la alúmina reactiva  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , de la puzolana al contacto con la cal.
- 3ª) Los geles de silicato cálcico hidratado neoformados ejercen una notable acción protectora ya sea limitando la cantidad de alúmina presente que

haya podido reaccionar con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ya sea disminuyendo la susceptibilidad, a los sulfatos, de los aluminatos que se puedan formar.

Sin perder esta línea, a continuación Turriziani, Río y Celani (105), tras sus trabajos afines confirmarían como conclusión de los mismos lo dicho por los anteriores, es decir, que la sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^{\text{r}}$ , del material puzolánico que emplearon, presenta en sus "confrontaciones" con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , una velocidad de reacción netamente superior a la de la alúmina correspondiente de dicho material puzolánico, precisando los autores mas aún, "y es que el objeto o fin de aquélla era y es impedir, o al menos frenar sensiblemente, la solubilización de ésta, y luego, en un cemento puzolánico, la formación o producción de un aluminato de neoformación".

Finalmente y al objeto de poder controlar si la menor "sulfatación". en el ensayo de Anstett, presentada por los cementos de alta proporción de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  fuera debida no tanto a la acción protectora de la sílice, cuanto, por efecto de la "disolución" ó mejor "dispersión", a un menor contenido de aluminatos, los autores piensan finalmente que no es el efecto "diluyente" ó "dispersante", sino mas bien que la presencia de mucha sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^{\text{r}}$ , de la puzolana presente origina una menor "sulfatación" de los aluminatos correspondientes. Igualmente demuestran los autores que, al parecer, la presencia de sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^{\text{r}}$ , provoca descomposición de la ettringita y/o Fase AFm presentes, lo que Taylor (161) posteriormente refirió como "hidrolizar los sulfoaluminatos presentes". Y del mismo modo Calleja (141) referiría en relación con el tema que no sólo se evita el ataque sobre la portlandita (lo que la puzolana consigue), sino también el ataque de los sulfatos (aguas y suelos selenitosos) a los aluminatos hidratados del cemento.

A continuación Jambor y Casopis (137) concluirían generalizando y sin precisar, hecho este muy común por estos años, que las adiciones puzolánicas, atenúan el proceso de captación de  $\text{SO}_3$ , con lo que se aumenta la resistencia a la acción agresiva del ión sulfato.

Paralelamente y una vez mas en España, dado el gran interés que este tema tenía y sigue teniendo en nuestro país, el Dr. Ingeniero de Caminos M. de Luxán B. (140) se haría partícipe de todas estas ideas al afirmar que en presencia de un exceso de cal los aluminatos son insolubles y entonces el sulfato del yeso, después de penetrar por difusión en el interior, actúa sobre el aluminato sólido y produce la destrucción; sin embargo cuando no hay mas que la de una disolución muy diluida, por la hidrólisis de los silicatos, al haberse combinado parte de ella con los elementos activos de una puzolana, la acción de los sulfatos se produce sobre el aluminato disuelto

y en este caso la formación de "sulfato-aluminatos", aumenta la compacidad con estos compuestos ya, no expansivos, con lo que la puzolana evita la destrucción del cemento.

A su vez Soria (139) coincidiendo con algunos autores de los citados y al particularizar para un cemento PAS-PUZ, afirmaría igualmente, siguiendo la línea de Calleja, que al emplear un clinker PAS, actual P-Y, se anula o al menos se atenúa notablemente, la posibilidad de agresión por medios sulfatados, en las primeras edades del conglomerante -ausencia de  $C_3A$ -; mas tarde, continúa el autor, la fijación de cal por parte de la puzolana, coloca al conglomerante en una región del sistema  $CaO-SO_4Ca-Al_2O_3-H_2O$ , en la cual, debido a la mayor solubilidad ocasionada por la baja concentración de calcio, se requieren concentraciones muy altas de sulfato de calcio para que el conjunto se traslade a la zona peligrosa de existencia de la ettringita -"sulfoaluminato expansivo"-. De igual modo, nos comenta el autor, debe tenerse en cuenta que a medida que avanza la edad del conglomerante también colaboran en la durabilidad los nuevos productos creados por la puzolana que impiden el acceso, por su impermeabilidad, del medio agresivo.

Y para el conjunto, y siguiendo la línea de Calleja, el autor refiere que el dualismo PAS-Puzolana atenúa notablemente la acción del ión sulfato, ya que junto a la falta de  $C_3A$  del clinker, que sería susceptible de ataque en las primeras edades, surge una bajada o descenso de pH del medio ambiente por efecto puzolánico de la puzolana, manteniendo por debajo del límite la basicidad que corresponde a la formación de "sulfoaluminatos" expansivos.

No obstante hemos de reseñar que este autor y para el caso de los citados cementos PAS-PUZ, actuales P-Y con puzolana, expuestos a los sulfatos, admite sin mas con otros autores:

- a) la posibilidad de ataque, aunque lento de la fase ferrítica y
- b) la reactividad de la alúmina presente en casi todas las puzolanas naturales y artificiales que puede conducir a la formación de ettringita expansiva.

Después sería Biczok (142) el que justificaría la "buena fama" al caso de los cementos puzolánicos, basándose en que en este tipo de cementos no puede formarse sulfato-aluminato de calcio hidratado, con lo que debido a la escasa cantidad de "portlandita" liberada durante la hidratación, no puede formarse sulfato de calcio hidratado en cantidades considerables.

También es de destacar en este caso que, contrariamente a lo expuesto, al respecto, por la "escuela italiana" referente a la necesidad de que el



cociente S/A supere el valor de 6, el autor narra que puzolanas artificiales eminentemente aluminicas, tales como el metacaolín (componente principal de las arcillas caoliníticas calcinadas y activas), fijan la portlandita liberada en la hidratación del cemento portland reduciendo con ello la posibilidad de formación de aluminato tricálcico hidratado perjudicial con lo cual no debe de extrañarnos, al decir del autor, que el empleo de hormigón de cemento de arcillas activadas en ambientes agresivos sea recomendado por el Instituto Soviético de Química que realizó los ensayos previos.

Igualmente Lea (17) tras revisar su primitiva hipótesis, la actualiza haciéndose partícipe de la nueva teoría existente sobre la acción protectora de los geles de neoformación, particularizado en el C-S-H formado entre la puzolana y la cal, la cual se deposita como un manto o cubierta impermeable sobre las superficies de las distintas fases en las que encuentra o puede encontrar el  $Al^{3+}$ , e igualmente sugiere, sin mas, la existencia de alguna otra inactivación del  $Al_2O_3$  de la puzolana, tal como la sustitución de  $Al^{3+}$  en la estructura del C-S-H, que puede tener, a juicio del autor, un efecto similar al anterior.

De igual modo se harían partícipes de Lea, Kalousek y colaboradores (35), para reconocer, no obstante y una vez mas, que el mecanismo por el cual la puzolana disminuye o protege del ataque sulfático no se conoce completamente.

Mas adelante Mehta y Gjörv (18) participarían de la ya clásica línea o idea que caracteriza este tema, al referir que las recomendaciones para fabricar cementos resistentes a los sulfatos, se basan en reducir el contenido disponible de  $Ca(OH)_2$  de los cementos portland hidratados mediante la adición de materiales con "sílice activa", tales como las puzolanas, los cuales son capaces de convertir dicho  $Ca(OH)_2$  en silicatos de calcio hidratados. Obsérvese como estos autores, al igual que los italianos, hacen extensible a todas las puzolanas, creemos que por considerarlas como un TODO, las buenas cualidades de resistencia al ataque de los iones sulfato que pragmáticamente vienen demostrándose única y exclusivamente para las eminentemente "silícicas" (con elevado contenido de sílice reactiva,  $SiO_2^r$ ).

Seguidamente M.P. de Luxan (143) comenta del mismo modo en su Tesis Doctoral, que el incorporarse puzolana al cemento portland tiene como fin principal fijar la cal liberada de su hidratación, creando compuestos hidráulicamente insolubles y estables, y aumentando tanto la resistencia mecánica como química, -generalizando aquí la autora al igual que otros investigadores- del producto resultante, pasando a insertar en el mismo todas las ventajas

de este tipo de cementos. No obstante y al igual que ocurriera con Soria, Biczok, etc., esta autora junto con Soria, y en respuesta (205) a Bensted (204), admitiría, que entre las muchas consideraciones que se deben tener en cuenta en la creación y puesta a punto de un ensayo de "sulfato-resistencia" al efecto, estaba, entre otras, el contenido porcentual de "alúmina activa" en la puzolana.

Paralelamente Bensted (74) destacaría la importancia que tiene el tipo de clínker usado para establecer los beneficios de una puzolana, pues mientras que para un clínker de cemento portland ordinario la puzolana generalmente resulta satisfactoria, para un clínker de cemento portland resistente a los sulfatos no lo es tanto. Normalmente por supuesto, continúa el autor, un clínker resistente a los sulfatos, no se usaría con una puzolana, ya que el del portland ordinario con la puzolana añadida daría propiedades de resistencia a los sulfatos; así por ejemplo con una puzolana artificial, como por ejemplo, una ceniza volante, el grado de resistencia a los sulfatos aumenta del cemento portland ordinario al portland resistente a los sulfatos pasando por este orden por el PUZ de matriz P y matriz P-Y correspondientes. En otras palabras, la resistencia a los sulfatos de un cemento P-Y, dice el autor, se ve generalmente disminuida al incorporarle tal puzolana, silenciándose que la del portland correspondiente se ve aumentada.

Dicho autor refiere también que la puzolana al fijar cal se vuelve inerte tendiendo a actuar de este modo mas como un "filler" causante de las pérdidas de resistencias mecánicas subsiguientes, y en función de este filler se originan menos uniones o enlaces con la puzolana de donde resulta esa mayor porosidad que la que hubiese desarrollado normalmente, dando como resultado todo ello una disminución en la resistencia a los sulfatos por debajo de la del cemento P-Y solo ó matriz.

Años más tarde, ya cercanos a la actualidad, este mismo autor volvería a insistir en su misma idea de considerar que toda puzolana, tras su reacción puzolánica subsiguiente, acaba finalmente como un "filler", siendo por ende nociva.

Por el contrario Calleja (206) da por supuesto que una puzolana ejerce "acciones-positivas-diversas", admitiendo para ello que:

- i) una puzolana determinada (siempre la misma) puede dar, en idénticas condiciones, resultados diferentes en varios aspectos - incluso buenos en unos casos y malos en otros - con distintos clínkeres portland;

- ii) un clinker determinado (siempre el mismo) puede dar, en las mismas condiciones resultados distintos en varios aspectos - incluso buenos en unos casos y malos en otros - con diferentes puzolanas;
- iii) una o varias puzolanas con uno o varios clínteres, en condiciones iguales o distintas, pueden dar, en aspectos diferentes, resultados de cualquier signo y magnitud.

Y a continuación afirma que "para que la fijación de cal tenga lugar con amplitud y eficacia, la puzolana debe ser lo más activa posible, dependiendo de la actividad total - otras cosas aparte - del contenido global de sílice y alúmina, y la actividad a corto plazo del contenido de alúmina principalmente; con el mismo fin el clinker portland debe poseer, como ya se indicó, un alto grado de saturación de cal y un elevado módulo silícico - es decir, un alto contenido total de silicatos, y en particular el tricálcico, y un contenido bajo de aluminato tricálcico, y tanto menor éste cuanto mayor sea el contenido de alúmina de la puzolana".

Recientemente Grzymek y colaboradores (148) continúan en la misma idea primitiva y casuística al afirmar que la positiva influencia de la diatomita se debe a la reacción puzolánica que se origina con el  $\text{Ca(OH)}_2$  liberado de la hidratación del cemento portland, con la formación subsiguiente de silicatos cálcicos hidratados de baja basicidad resistentes a la corrosión, disminuyendo así el contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  en el medio, con lo que previene la formación de grandes cantidades de yeso, en su caso, y de ettringita. Así y a diferencia de otros investigadores, llevan a efecto un trabajo en esta materia que tras aportar más datos al respecto, no por ello deja de ser casuístico, alejándose de este modo de un tratamiento y estudio global, conjuntado, armónico y metodológico del mismo.

De idéntico modo, o sea, experimentalmente, y al mismo tiempo, Uchikawa y colaboradores (207) estudian la influencia de la puzolana en la velocidad de hidratación del  $\text{C}_3\text{A}$ , con y sin yeso presente y obtiene, como conclusiones fundamentales entre otras, para el fin de este trabajo:

- 1\*) En el sistema "puzolana -  $\text{C}_3\text{A}$  -  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , con indiferencia de la presencia de  $\text{Ca(OH)}_2$ , la hidratación inicial del  $\text{C}_3\text{A}$  y la formación de ettringita y "monosulfato" (Fase AFm), fueron aceleradas por la adición de la puzolana.
- 2\*) La puzolana tiende a rebajar o disminuir el grado de hidratación del  $\text{C}_3\text{A}$  a edades más avanzadas.
- 3\*) Los tipos y clases de productos de reacción formados, así como

su cuantía respectiva se producen en función de la composición de la puzolana, así la alta en sílice da C-S-H y la rica en álcalis  $C_3AH_6$ .

Por otra parte Calleja y Veronelli (197) mencionan la influencia que las puzolanas de los cementos puzolánicos, y sobre todo las más ricas en sílice activa precisamente, tienen en la formación, y más aún en la estabilidad de dicho compuesto expansivo en el sentido de que su hidrólisis, aumenta al aumentar la relación puzolana/ettringita, mas en agua destilada, que en disolución saturada de  $Ca(OH)_2$ .

Ultimamente Mehta (198) relacionando la calidad y cantidad de durabilidad química de un conglomerante hidráulico hidratado con la distribución del tamaño de poro en la pasta endurecida correspondiente, llegaría a afirmar que al parecer los grandes poros son los responsables de las bajas resistencias y en general, baja durabilidad, mientras que los pequeños poros, como consecuencia de las reacciones puzolánicas, juegan un papel muy importante en el aumento de resistencias mecánicas, impermeabilidad y durabilidad química.

Y ya en la actualidad Samanta y Chatterjee (149) atribuyen el aumento de resistencia a los sulfatos que sufren los cementos portland a la adición de puzolanas por:

- a) la disminución o ausencia de portlandita del medio por su fijación por la puzolana.
- b) la sugerencia de que, en presencia de puzolana, el monosulfato-aluminato formado no expansivo - al decir de los autores -, se origina predominantemente antes que la ettringita - forma expansiva -.
- c) la inhibición del proceso corrosivo debido a la formación rápida de yeso, en su caso
- d) la creación o formación de los productos de reacción en forma de gel, los cuales impiden ulteriores penetraciones de la disolución corrosiva, y particularmente mas aún a la capa de C-S-H, gel de tobermorita, que recubre y protege a los aluminatos vulnerables (aluminato tetracálcico hidratado), como sugirió Steopoe.
- e) la teoría de Lafuma

Finalmente y como consecuencia del estudio efectuado a partir de la bibliografía reseñada, se obtienen las siguientes conclusiones:

- 1ª.- Es de destacar que, de origen, tanto los planteamientos de los problemas como sus soluciones respectivas continúan siendo más casuísticos, particulares e inconexos, que causísticos, generales y globales. No obstante dichos planteamientos así como sus explicaciones y/o soluciones correspondientes, se hacen de tal modo, que los buenos resultados que se obtienen con determinadas y concretas puzolanas y/o cementos puzolánicos, fácilmente puedan hacerse extensibles y/o extrapolables, por el lector y/o sector tecnológico, principalmente, al resto o totalidad de las puzolanas y/o cementos puzolánicos, ya que ambos, puzolanas y/o cementos puzolánicos, los suelen considerar como sendos TODOS UNICCS separados respectivos.
- 2ª.- Contrasta bastante, en determinados trabajos, la fuerza y unidad de criterio común inicial, con las a veces puntualizaciones u observaciones, más recientes, en contra.
- 3ª.- Es igualmente notorio y coincidente que aparente y casuísticamente, los "buenos resultados obtenidos" en TODOS los trabajos que se han realizado sobre esta temática tengan, por lo general, de común la presencia de puzolana "silícica" (aquella que posee un elevado contenido de sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^-$ ).
- 4ª.- Tanto de este apartado como del anterior IV.5.3., cabe pensar que pese al buen comportamiento de las mismas (bien solas o en coyunda), en ambientes sulfáticos, presentado, intencionadamente o no, por muchos investigadores, existen, no obstante, algunos casos notables que las cuestionan, sin haberse dado la(s) explicación(es) que avale(n) tales comportamientos discrepantes.
- 5ª.- Es de destacar que muchos de los autores citados proponen que por lo general, una de las causas de la no formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados expansivos y por ende del efecto "protector" ó "anti-sulfato" de las puzolanas ante el ataque sulfático, es la baja concentración de portlandita,  $\text{Ca(OH)}_2$ , del medio líquido, por fijación de la misma por la(s) puzolana(s) por efecto puzolánico, lo cual lleva implícito un descenso de iones sulfato y aluminato en el mismo. No obstante hemos de decir que esta idea está en franca discordancia con lo que dicen al respecto Jones, Kalousek, D'Ans y Eick y lo confirmado por Eitel, y es que pese a que haya baja o muy baja concentración de  $\text{Ca(OH)}_2$  se forman sulfato-aluminatos de calcio hidratados expansivos.
- 6ª.- También son notables las explicaciones que se dan al efecto protector de la sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^-$ , presente en gran cantidad en determinadas puzolanas y su extrapolación a todas ellas por contenerla en mayor o

menor cuantía, dado que los geles, mas o menos tobermoríticos, que forman actúan:

- a) protegiendo sin mas, siempre que sean geles de neoformación, ó
- b) protegiendo como "manta protectora" sobre los aluminatos expansivos, siendo la "calidad" de la misma función de la "cantidad" de sílice reactiva,  $\text{SiO}_2^-$ , presente, ó
- c) "hidrolizando" y descomponiendo los sulfato-aluminatos expansivos que se pudieren formar, ó
- d) impidiendo la solubilización de la alúmina por problemas de velocidad de hidratación y subsiguiente mayor coeficiente de reparto en favor de los silicatos, ó
- e) protegiendo siempre y cuando la coordinación de los aluminatos "acompañantes" sea 4, ó
- f) protegiendo, siempre y cuando el cociente S/A tenga un determinado valor, ó
- g) protegiendo al disminuir la susceptibilidad de los aluminatos, que se puedan formar, a los iones sulfato.

7ª.- A estas hipótesis anteriores hay que añadir que casi todos (208) los investigadores están de acuerdo en que dada la mayor sup.espf.de las puzolanas, su presencia en pastas, morteros y/u hormigones, les proporciona mayor compacidad a todo el conjunto, la cual actúa como elemento protector de "primer grado", pues de todos es conocido el viejo axioma cementero referente a la mayor durabilidad de un hormigón compacto de cemento portland no apropiado, sobre la correspondiente de otro hormigón poroso de cemento portland apropiado.

8ª.- Hemos de destacar también, la existencia de bastantes trabajos sobre el empleo de las puzolanas "silícicas", no pudiéndose decir otro tanto de las correspondientes puzolanas "férricas" (aquellas que poseen un elevado contenido de óxido férrico reactivo,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^-$ ), pues a diferencia de lo que ocurriera con los cementos portland férricos (actuales P-Y españoles), no se ha encontrado trabajo alguno sobre el uso específico de éstas últimas.

IV.6.- Consecuencias de las Generalidades sobre la Resistencia Sulfática de los Cementos Portland, de los Cementos PA y PUZ y de las Puzolanas y su Medición y Control antes de su Puesta en Obra: Necesidad de métodos Acelerados de Ensayo para su Cuantificación y Cualificación Previa correspondiente. Parámetros calificadorios empleados en cada uno de ellos. Consecuencias.

En este apartado se reseñan y estudian aquellos trabajos recopilados en la bibliografía, en donde se estudian métodos de ensayo o técnicas de trabajo existentes para determinar en periodos cortos de tiempo, el comportamiento de los cementos portland y portland con puzolanas, en su caso, frente a disoluciones de sulfatos procedentes de distintas sales.

Así en el Symposium de Estocolmo (Suecia), año 1938, y tras las discusiones habidas entre Thorvaldson, Crichton y Hakason, como consecuencia de la comunicación presentada por Lea (209) sobre "La Química de las Puzolanas" el primero manifestó haber intentado evaluar el comportamiento de las puzolanas mediante su resistencia a las disoluciones de sulfatos, pero concluiría que los efectos secundarios producidos por otras variables eran demasiado grandes para permitir una valoración y subsiguiente clasificación reproducibles. Esto sería posteriormente recogido y comunicado, por su interés, por Moran y Gilliland (25) en el Symposium norteamericano sobre puzolanas celebrado en Octubre de 1949 en San Francisco, California.

La importancia de este tema era incuestionable, buena prueba de ello fué la realización del Symposium monográfico antes citado, donde autores tales como Davis (25) afirmaron que "la composición química de una puzolana no da indicio alguno para deducir su poder de combinación con la cal", hecho este discutido durante largo tiempo, haciéndose por ello necesario el desarrollo de un método de ensayo satisfactorio, que empleado con facilidad y fiabilidad, pueda ser seguro para evaluar una puzolana dentro de un periodo de tiempo razonablemente corto. Y se podría añadir que idénticamente debe de ocurrir para su comportamiento en un medio sulfático, el cual, entre otros, es objetivo del presente trabajo de Tesis Doctoral.

El mismo autor reconocía que durante varios años el Sponsoring Committee on Blended Cements de la ASTM, Comité C-1, sobre Cementos, tuvo, y continúa teniendo, desde el punto de vista de la resistencia de tales cementos al ataque sulfático (144), como única meta de su trabajo la consecución y puesta a punto de una adecuada especificación para cementos puzolánicos, ya que en base a los conocimientos que se poseían, no existían ni existen, desde tal punto de vista, métodos acelerados de ensayo de respuesta rápida, para

predecir el comportamiento de una puzolana y/o cemento puzolánico en el hormigón del que entre a formar parte y en especial, como decimos, del sometido a la acción de los iones sulfato.

Bastantes años después Polivka y Brown (27) volverían a replantear dicho problema, al recomendar y llevar a efecto la puesta en práctica de un estudio físico-químico del mecanismo por el cual las puzolanas mejoran la resistencia a los sulfatos de los cementos portland. Los resultados de tales investigaciones, señalaban la necesidad urgente de un método acelerado de ensayo ágil, económico y fiable para evaluar la resistencia a los sulfatos, de hormigones fabricados con cemento portland y puzolana, de aquí que a continuación, y en principio única y exclusivamente para los cementos portland, el Comité C-1, sobre resistencia a los sulfatos de la ASTM, creara una tentativa (210) de método acelerado de ensayo para medir la resistencia potencial a los iones sulfato pero sólo para los cementos portland. De aquí que los citados autores propusieran que "debería" experimentarse dicho procedimiento de ensayo con barras de mortero conteniendo puzolana como sustitución parcial del cemento portland resistente o no a los iones sulfato, como se ha hecho en este trabajo de Tesis Doctoral.

A continuación Woods (211), tras reconocer que todos los ensayos a largo plazo, amén de seguros son impracticables, informaba de la puesta a punto de una tentativa de método acelerado de ensayo, el citado anteriormente, el cual desgraciadamente, sólo era aplicable a cementos portland y no a puzolánicos ni de escorias.

La opinión de este autor fué compartida igualmente aquí en España y mas concretamente en el IETcc por D. Pablo García de Paredes (212), el cual vino a decir que la duración que requieren las experimentaciones a largo plazo así como también la imposibilidad material de asegurar una identidad en las circunstancias entre ensayos paralelos o sucesivos, mermaba la seguridad generalizadora del valor de este modo de proceder, por todo lo cual se impone el empleo de métodos que suministren, en un plazo relativamente corto, la información deseada sin mengua notable de la velocidad del diagnóstico, es decir, que en la práctica cotidiana es imprescindible utilizar métodos rápidos o acelerados para todas las clases de cementos.

Por otra parte Lerch (213), en el informe que presentó como presidente del Comité de Trabajo sobre la resistencia a los sulfatos, de la ASTM, decía en una de sus conclusiones: "Sería deseable tener igualmente una tentativa de método acelerado de ensayo que fuera apropiado para TODOS los cementos, haciéndose esta necesidad mas acuciante para los Cementos Puzolánicos y



Portland de Alto Horno, máxime cuando el actual método ASTM C452-60T sólo es válido para los portland".

Este informe sería igualmente recogido, aquí en España, en el IETcc, por D. Pablo GARCÍA de Paredes (212), dado el interés que este tema suscitaba -y suscita- en dicho centro y en definitiva en nuestro país.

Poco después y en esta misma línea Jugovic (214) referiría que el citado Subcomité de resistencia a los sulfatos de la ASTM, había estado considerando la introducción de mejoras en las limitaciones químicas de los cementos portland resistentes a los sulfatos y que además había estado explorando igualmente el desarrollo y puesta a punto de métodos de ensayo acelerados para evaluar la resistencia a los sulfatos de los cementos puzolánicos y portland de alto horno.

La importancia de aplicar tal tentativa de método acelerado de ensayo ASTM C452-63T (215), sería reafirmado una vez mas posteriormente por Mehta y Gjörv(18) al referir que "en vista de que los constituyentes aluminicos de escorias y puzolanas, pueden reaccionar químicamente si son atacados por disoluciones de muy elevada concentración de sulfatos, era obvio que dicho método ASTM C452, NO ES APROPIADO, -en palabras de los autores- para su aplicación a cementos portland con adiciones activas, tales como los portland con escorias de alto horno y los portland con puzolanas".

Como consecuencia de tales manifestaciones los citados autores Mehta y Gjörv(18), así como Mehta (216) a continuación, pondrían a punto sendos nuevos métodos acelerados de ensayo de los cuales y en especial el último, engloban dentro del mismo, el ataque producido por disoluciones de sulfatos -"sulfate attack", según el autor- ó debido a pH menores de 7 -"acidic attack" según el autor-, inherentes a la "hidrólisis" del correspondiente sulfato en agua, siendo dicho método aplicable, según su autor, tanto a cementos portland como puzolánicos. No obstante, a nuestro juicio, dicho método propuesto por Mehta no es tan versátil, rápido y funcional como el descrito en la norma ASTM C452 citada, de aquí que, hasta el momento, no haya tenido el eco suficiente y necesario dentro del compendio de ensayos tecnológicos acelerados para cementos.

Como prueba de lo dicho, C. Mather (144) afirmaría que en vista del problema existente "hoy tenemos ante nosotros un trabajo que realizar al objeto de obtener y disponer de un ensayo preferente y SATISFACTORIO, aplicable a los cementos con adiciones activas y/o cementos de mezcla, por lo cual espero y deseo que el Subcomité sobre resistencia a los sulfatos de la ASTM sea capaz de proporcionarlo con prontitud".

Esta misma inquietud sería, una vez mas, recogida en España y mas concretamente en el IETcc, cuando en una publicación (217) del autor de este trabajo, y ante los usos que se venían haciendo en nuestro país con la aplicación indiscriminada del método en cuestión, se recordaba a los fabricantes, usuarios e investigadores del ramo que el mismo es "sólo aplicable a los cementos portland", de donde se deducía y deduce el interés que tiene la investigación y experimentación previas, a fin de AMPLIAR, si fuera posible, el campo de aplicación de dicho método a otros cementos distintos al portland, de aquí que, en principio, se haya abarcado en este trabajo los actuales cementos PA y PUZ, constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s), dejando para fases posteriores, si ha lugar, los PHA, y/o los PS, y/o los SS, y/o los Aluminicos, etc Por último y ya recientemente Seligman (218) concluiría una vez mas que el método acelerado de ensayo ASTM C452 no predice el probable comportamiento real de cementos portland con puzolana, por el contrario y para los portland con escorias de alto horno, si parece que pueda haber alguna posibilidad de poderlo emplear. No obstante el autor no nos comunicaría si las razones de tal posibilidad, eran hipotéticas o experimentales, y si por el contrario que el método (35) empleado ultimamente por el Bureau of Reclamation y consistente en someter a los hormigones fabricados respectivamente con cada tipo de cemento puro o de mezcla, a ciclos de inmersión alternativa en disolución de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  al 2,1% y al aire, respectivamente, para mostrar alguna esperanza de empleo para cementos portland con adiciones activas, pero hasta el momento y a diferencia del de la ASTM para los cementos portland, no ha sido normalizado.

Como consecuencia de los trabajos anteriores se deduce la necesidad de contar con un método acelerado de ensayo que, amén de reunir las mejores características de los mismos, pueda ser aplicable entre otros, a los cementos PA y PUZ constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s), dado que estos cementos están siendo, en particular los primeros (277), y van a ser, en particular los segundos, los llamados a sustituir, cada día mas, en igualdad de condiciones, a los cementos portland empleados hasta hoy, por las razones energéticas aducidas en el PREAMBULO. Para lo cual y previamente es necesario reconocer y señalar, que existen numerosos métodos de ensayo, mas o menos acelerados, para predecir el comportamiento de los cementos frente a diversas disoluciones de sulfatos, habiendo sido alguno(s) de ellos recogidos en las normas nacionales correspondientes, los cuales como decimos se han recopilado citándose a continuación, ver Tabla 10, a la vez que señalando las variables que se determinan en cada método, así como el documento (norma, artículo, libro,...) en donde se encuentran.

**TABLA 10**

**MÉTODOS ACCELERADOS DE ENSAYO SOBRE RESISTENCIA SULFÁTICA**

Nombre del Método de Ensayo de "SPRIS" y/o Autor(es) del mismo	Código Bibliográfico	DIFERENTES					PARAMETROS					UTILIZADOS				
		L <sup>o</sup> AL <sup>o</sup> Δ <sup>o</sup>		RM Δ ARM			ECO	AQ	W ΔW	MO ME VU	T	PCC	PAV	PAMPA		
		C	F	T												
Dallas G. Miller	(29)		X													
T. HERRIMAN (1)	(219)					X		X								
T. HERRIMAN (2)	(128)							X								
Bogus-Taylor-Loren	(44)							X								
LE CHATELIER-ANSTETT	(223)	X				X								X		
Davis-Kelly-Treanor	(20)	X	X			X			X	X						
Stappes	(221)								X							
Paul	(9)								X							
Miller y deacon	(7)	X	X													
"Martens Peers" Miller y Snyder	(9)	X								X						
Dallas G. Miller	(30)	X														
McMinn-Broadbent-Tyler-Henson	(8)	X	X			X				X					X	
Davis-Henson-Brown	(25)	X	X	X												
Davis-Walsham	(3)	X														
Thompson, Thompson y colab.	(222)	X						X								
Higginson-Sloane	(129)	X	X						X	X						
TAYLOR-BOGUE	(228)								X							
ASTM Bnl. n.º 212 ASTM C 452-68	(212)	X														
"Industria Acelerada" - Sopro	(209)	X						X								
Niger-mem	(224)								X							
Palmer-Brown	(27)	X	X			X			X							
"Vanderberg" KOCH Y STEINER	(225)			X												
"Primas Pinos" WITTENHUT	(226)	X				X										
LEA (1)	(213)							X								
LEA (2)	(214)	X														
LE CHATELIER-ANSTETT BLONDIAU	(227)	X				X								X		
Marksted	(227)		X													
Bleas	(142)												X			
Jambor-Cosgrove	(137)		X			X				X						
Hede	(228)	X						X		X						
"Primas Delgado" DE PAREDES	(212)							X	X	X						
"Mora-Primas" DE PAREDES	(212)							X	X	X						
Jacob	(229)	X						X								
Stimpson	(229)	X														
Orin	(230)								X							
Euroch y Megon	(231)		X			X										
Forrester	(232)		X													
Matta y Gjer	(16)		X			X										
Matta	(248)		X			X										
FW Brown	(253)	X	X								X					
Benard	(74)	X	X			X					X					
Leah	(215)					X										
"Martens magre"	(212)	X														
Klad	(212)			X												
Vand Aardt	(212)	X														
Verpoot	(212)									X						
Salmeston	(212)								X							
Fraser	(212)	X														
C.E.R.I.L.H.	(212)	X														
A.P.C.M.	(212)	X														
A.C.I.	(212)					X					X					
Bois	(212)		X	X												
"Paul y Chomaz"	(234)					X										
Norma Romana	(239)	X				X										
Norma Holandesa	(236)	X														
Norma Checoslovaca	(237)	X														
Norma USA ASTM C 452-78	(238)	X														
Norma Rusa	(240)	X														
Norma Alemana Pul.	(238)	X												X		
Bureau of Roadwork, USA	(212)	X														
Número total de veces que se utilizó cada parámetro		33	16	4	1	19	14	5	7	1	1	2	1			

\* "SPRIS" = Referencia al ensayo de sulfatación acelerada en este método.

De dichos métodos una vez estudiados, se han seleccionado el Le Chatelier-Anstett-Blondiau, ó método Anstett y el ASTM C452 para aplicarlos en este trabajo por las razones que se verán seguidamente, de aquí que únicamente se describan compendiados el procedimiento operatorio de ambos, y no el de todos ellos.

IV.6.1.- Razones de la elección de los métodos acelerados de ensayo Le Chatelier-Anstett y ASTM C 452, para la realización de este trabajo:  
Descripción somera de los mismos y Parámetros determinados en cada uno de ellos.

Como se ha dicho, al final del apartado anterior, de entre todos los métodos acelerados de ensayo citados, nuestra atención se fijó en dos:

- a) El método europeo Le Chatelier-Hanstett, L-A, original (145)(220), ó simplemente ANSTETT, que posteriormente sería readaptado por Blondiau (199), de aquí que en la actualidad se le conozca también con el nombre de Le Chatelier-Anstett-Blondiau.
- b) El método norteamericano ASTM C 452-6CT original (241), que continuó invariablemente con la determinación del agua de amasado para cada cemento portland ("cada cemento portland su agua de amasado") hasta 1975, para a partir de esa fecha pasar a denominarse ASTM C 452-75 (239), que es como se le conoce actualmente ASTM C 452-83 por tener un agua de amasado "fija" ó "constante" ("para todos los cementos portland "idéntica" agua de amasado"), para cada caso de todos los posibles existentes de cementos portland con o sin aireantes. En este trabajo se han puesto en práctica los dos, original y actual.

Y las razones por las que se eligieron ambos métodos acelerados de ensayo, fueron las siguientes:

A) Generales.-

- 1º.- Por tener ambos métodos de común el sulfato de calcio dihidrato o piedra de yeso ó algez,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , como agresivo sulfático, siendo este a la vez el constituyente fundamental de la España yesífera. Por ello las conclusiones que se obtuvieran podrían ser integralmente aplicables a la ya clásica problemática nacional: Las aguas selenitosas y los terrenos yesíferos.
- 2º.- Por la investigación científica y/o técnica que con ellos se pueda realizar ya que los sulfato-aluminatos de calcio hidratados expansivos que se forman en ambos métodos, aunque diferentes en tiempo y momento de su génesis, proceden de la reacción en medio acuoso del agresivo,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , y los compuestos hidratados del cemento.
- 3º.- Por haber sido calificados ambos métodos por los investigadores de SEVEROS, en mayor o menor grado, siéndolo el ASTM C 452 de SEVERO (242)

(243), y el L-A de DRASTICO o MUY SEVERO (16)(130)(133)(136)(144)(152)(161)(242)(243), que al decir de algunos raya en lo IRREAL, por su desconexión con la realidad, ya que el hormigón en obra ni remotamente se encontrará, al decir de todos los autores, con una concentración de sulfato tan elevadísima como la que emplea el método en cuestión. Por lo que a fuer de ser excesivamente severo y ante la falta del método patrón ideal hemos creído conveniente emplearlo como de referencia.

- 4\*.- Porque ambos métodos se crearon específicamente para los cementos portland aunque el L-A, con el tiempo, sería utilizado por los investigadores italianos (133)(136), precisamente por su excesiva severidad, para "juzgar sus cementos puzolánico", dada la importancia y trascendencia nacionales e internacionales de "sus respuestas" para la industria italiana del ramo.
- 5\*.- Porque la mayoría de los trabajos comparativos (244)(245)(246), realizados hasta el momento, dieron idénticos resultados o respuestas incluidos los cementos con adiciones activas; no obstante en uno de ellos (247) se manifestó lo contrario.
- 6\*.- Porque los métodos acelerados de ensayo para valorar la resistencia de los cementos al ataque de los sulfatos, basados en la inmersión de barras de mortero POBRE en diversas disoluciones sulfáticas, han mostrado, a diferencia de los elegidos en este trabajo (L-A, pasta hidratada, y ASTM C 452 mortero "magro", relación 1:2,75 mezcla-conglomerante, cemento mas yeso :arena), una escasa reproducibilidad interlaboratorios. De aquí que hayan de ser éstos y no aquéllos, los que, en todo caso, se puedan emplear para extraer y fijar normativas límite apropiadas.
- 7\*.- Porque ambos métodos utilizan como parámetro, el incremento de variaciones dimensionales (L-A incremento porcentual de diámetro,  $\Delta\phi$  (%); ASTM C 452, incremento porcentual de longitud  $\bar{\Delta L}$  (%)) para calificar a los cementos portland "de elevada resistencia, ó no, al ataque de los iones sulfato, en general, y de calcio (yeso) en particular".
- 8\*.- Por ser ambos discordantes en sus características propias, pues pese a poseer los dos todas las características que debe poseer un buen método acelerado de ensayo, como son:  
Validez, Precisión, Simplicidad, Agilidad y Facilidad de Manejo, Rapidez de Respuesta, Selectividad, Repetibilidad, Reproducibilidad y Economía ó poco Coste,

se diferencian en las mismas en:

- a) su distinto grado de severidad por su distinto aporte de  $\text{SO}_3$  (en forma de yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), lo cual se traducirá en que mientras el primero, L-A, posee  $\text{SO}_3$  suficiente 15,5%, para poder pasar a ettringita hasta un 17,44% de  $\text{C}_3\text{A}$ , el segundo, ASTM C 452, sólo posee  $\text{SO}_3$  suficiente, 7,0%, para poder pasar a ettringita hasta un 7,87% de  $\text{C}_3\text{A}$  (251)(252), de donde cabe deducir que en realidad el método ASTM C 452 actúa, al igual que el L-A con un exceso de yeso sobre la necesidad real, única y exclusivamente con aquellos cementos portland cuyo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  fuese menor del 7,87% de  $\text{C}_3\text{A}$ . Esto es, trata a tales cementos portland como debe ser, (con idéntica excesiva severidad que el L-A trata a los de contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  inferior al 17,44% o sea prácticamente a TODOS los cementos portland), puesto que tales cementos portland o son de moderada o de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato y por ende deberán de ser los mas severamente "agredidos" y juzgados para finalmente poderles asignar responsablemente por el especialista, adecuados usos. Por el contrario para el resto de los cementos portland, aquellos cuyo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  es mayor del 7,87%, el método ASTM C 452 a diferencia del L-A, actúa con menor severidad pues al faltar por estequiometría yeso para convertir en ettringita todo el  $\text{C}_3\text{A}$  presente, procede como un "sensibilizador" de aquéllos, dependiendo de su cuantía presente el "grado de sensibilización",  $\Delta L(\%)$ , alcanzado ó producido en el cemento portland correspondiente, es decir, operando de igual modo pero con significado opuesto, a la prueba de la "tuberculina" en los humanos.
- b) su distinto campo de aplicación ya que el L-A, ideado originariamente para los cementos portland, en la actualidad está bastante circunscrito a los cementos P, PA y PUZ principalmente, mientras que el ASTM C 452 lo está única y exclusivamente a los cementos P, según reza su título (ASTM C 452-75).
- c) su distinto grado de simplicidad, agilidad y facilidad de manejo, en favor del ASTM C 452.
- d) su diferente rapidez de respuesta, igualmente en favor del ASTM C 452.

3) Particulares.-

a) del Le Chatelier-Anstett, L-A:

- 1ª.- Por haber servido este método de contraste, convirtiéndose con el tiempo, por su excesiva severidad, como método de referencia, ya que ante la falta, pese a su necesidad imperiosa, del método ideal, muchos investigadores (206) en especial italianos (131)(134), lo consideraron como tal por razones de seguridad total y absoluta ante los resultados de su diagnóstico.
- 2ª.- Porque este método, según Jaspers (208), parece ser el método acelerado de ensayo mas apropiado para diferenciar, desde el punto de vista de resistencia al ataque de los sulfatos, según el autor, a los cementos portland "metalúrgicos", puzolánicos y sobresulfatados (245), no concordando con Biczok (142) en los siderúrgicos o "metalúrgicos" y sobreulfatados.
- 3ª.- Porque este método "pasando por ser de los mas drásticos, es discriminatorio", según Calleja y Aguanell (243), ya que «trata peor» a los cementos puzolánicos que a los portland, o mejor a éstos que a aquéllos es decir, que los cementos puzolánicos, en general, tienen, según dichos autores, bastantes probabilidades de ser mas susceptibles que los portland frente al ensayo de L-A.
- 4ª.- Porque la operatoria de este método de ensayo, se adapta completamente a las máximas y mejores condiciones de curado que en determinadas ocasiones les son exigibles a los hormigones en la práctica real antes de entrar éstos en servicio y por lo tanto en contacto, en su caso, con las disoluciones sulfáticas agresivas.

b) del ASTM C 452:

- 1ª.- Por la concordancia de resultados existentes entre los proporcionados por los correspondientes hormigones a escala real (8)(250) y las limitaciones físico-químicas (6) existentes al efecto, aunque y con respecto a estas últimas se reconoce la existencia de alguna excepción trascendente, de aquí las actualísimas y vivas discusiones existentes (248) al efecto.
- 2ª.- Porque es el método de ensayo actualmente exigido, en su caso, en las transacciones comerciales internacionales.
- 3ª.- Porque la operatoria de este método de ensayo, se adapta completamente a las condiciones de puesta en obra y entrada en servicio de un hormigón tradicional en la práctica real, sin exigencia expresa alguna de máximas condiciones de curado antes de su entrada en servicio.

Por otra parte se ha de decir que por las múltiples razones surgidas como se verá a medida que se obtenían resultados experimentales y sus consecuencias de la POP y de la POF, las cuales se encuentran en cierta medida compendiadas con algunas otras adicionales en el apartado VIII.3.1 venidero, se creyó conveniente y oportuno seleccionar un tercer método de ensayo surgido de la "hibridación" razonada de los dos aquí seleccionados antes citados, el L-A y el ASTM C 452, al cual y en principio se le ha bautizado lógicamente con el nombre de HIBRIDO-1.

Y por último se ha de decir también al respecto, que los parámetros determinados en cada método acelerado de ensayo seleccionado citado, se encuentran en los apartados, VIII.1.1, del L-A, VIII.2.1, del ASTM C 452 y VIII.3.2, del HIBRIDO-1, respectivamente, todos ellos venideros.



V.- OBJETIVOS

#### V.- OBJETIVOS

Todos los objetivos de este trabajo se pueden compendiar del siguiente modo:

##### V.1.- Principales

- (A).- Confirmación, ó no, de si la resistencia química de los Cementos Portland con adición de materias puzolánicas únicamente, hasta un 40% en peso (considerados como un TODO UNICO, HOMOGNEO E INDIVISIBLE), se extiende, entre otras, a AGUAS SELENITOSAS.
- (B).- Estudio CAUSISTICO del comportamiento de las Puzolanas al mezclarlas con Cementos Portland diversos, en un medio portlandítico y selenitoso ADECUADOS.
- (C).- Determinación del CARACTER "silícico" ó "sílico-aluminoso", ó "aluminosilícico" ó "aluminico", fundamentalmente, de una Puzolana dada. Consecuencias científico-tecnológicas si las hubiere.

##### V.2.- Secundarios

- (D).- Estudio de las posibilidades de aplicación de los métodos acelerados de ensayo Le Chatelier-Anstett y ASTM C 452 (tal cuales o adaptados), creados para los Cementos Portland en exclusiva, (en particular el ASTM C 452), a los Cementos de Mezcla PA y PUZ constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s) hasta un 40% en peso de esta(s) última(s).
- (E).- Estudio de la posibilidad de la puesta a punto de un nuevo método acelerado de ensayo, o al menos su FUNDAMENTO, que compendie en lo posible las ventajas de ambos métodos anteriores y trate de evitar del mismo modo sus defectos, y sobre todo que pueda ser aplicable, en principio, tanto a los Cementos Portland como a los Cementos de Mezcla PA y PUZ constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s) hasta un 40% en peso de esta(s) última(s).

VI. FUNDAMENTOS

## VI.- FUNDAMENTOS

Antes de comenzar este capítulo, se ha de hacer constar que pese a ser el apartado VI.3.1. Selección de Materiales una consecuencia lógica y directa de los capítulos V. OBJETIVOS y VI. FUNDAMENTOS, respectivamente, a lo largo de la exposición de este último será obligado realizar algunas referencias concretas a aquellos, causa por la que en cada ocasión se indicará la necesidad de acudir a la Tabla 11 donde se encuentran agrupados ordenadamente los resultados del análisis químico específico cualitativo y cuantitativo de cada uno de ellos.

### VI.1.- Fundamentos Generales:

Para la consecución de los objetivos citados en el Capítulo V anterior, se han aceptado previamente las siguientes tesis e hipótesis de trabajo:

- 1º.- Aceptar que la formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados puede llevar implícitamente asociada una expansividad, de origen concreto, aún desconocido, pero que generalmente es disruptiva y nociva para el hormigón endurecido de cemento portland que es atacado por aguas agresivas sulfáticas.
- 2º.- Aceptar, el fundamento general anterior pero aplicado esta vez a hormigones de determinados cementos puzolánicos, dadas las indicaciones de Malquori (181)(261) existentes al respecto y referentes a que "los cementos puzolánicos no poseen propiedades intrínsecas o específicas contra la acción de los sulfatos" dado que, según el autor, "la alúmina de los materiales puzolánicos se encuentra en la pasta de cemento en forma de aluminatos de calcio normalmente vulnerables a los sulfatos".
- 3º.- Dar por auténtico, verdadero y cierto, por haberse demostrado, que como consecuencia de la reacción puzolánica, la  $\text{SiO}_2^{\text{R}}$ , la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{R}}$ , y el  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{R}}$ , de una puzolana "fijan cal", disminuyendo notablemente, sin llegar a hacerla desaparecer, la concentración de hidróxido cálcico del medio, procedente de la hidratación del cemento portland, para dar los silicatos, aluminatos y ferritos, de calcio hidratados, cristalinos y/o coloidales diversos, correspondientes, que cementan y compactan aún mas la masa de la pasta, mortero u hormigón, respectivos, permaneciendo en él y con él, con todas sus posibles, o no, consecuencias ulteriores ante cualquier ataque agresivo y particularmente selinitoso del mismo.
- 4º.- De lo cual se deduce la no aceptación, en su integridad, del aserto generalizado de que la citada "fijación de cal" por parte de la puzolana coloca al conglomerante en un medio de menor concentración de hidróxido cálcico con lo cual y al decir de algunos investigadores citados, se

evitaría la formación de sulfato aluminatos de calcio hidratados o al menos si se formaban que no fuesen expansivos. A tal efecto cabe citar aquí que Uchikawa y Uchida (207) demostraron que en el sistema "puzolana- $C_3A$ -yeso", independientemente de la presencia, o no, de hidróxido cálcico en la hidratación inicial del  $C_3A$ , la formación de ettringita y Fase AFm, se vió acelerada por la adición de puzolana, lo cual nos alentó aún más para aceptar y establecer esta hipótesis de trabajo.

- 5º.- Que aún habiéndose comprobado que la ettringita se forma fundamentalmente en disoluciones saturadas de hidróxido de calcio, sin embargo, es bastante probable, que al ser la concentración del mismo en la fase líquida de los cementos puzolánicos recién amasados con agua, también saturada -aunque su "reserva alcalina", ó mejor "reserva portlandítica", sea bastante menor que la de los portland-, continuará siéndolo en cuantía y tiempo, suficientes para poder permitir la formación de ettringita. A tal efecto Eitel (56) precisa que, además de los datos aportados en este sentido por D'Ans y Eick (55), para que se produzca la reacción entre los aluminatos y el sulfato de calcio, no es indispensable una alta concentración de hidróxido de cálcio, hecho este por otro lado posiblemente frecuente en los cementos puzolánicos, entre otros, de elevado contenido de puzolana en exclusiva.

- 6º.- Aceptar que todas las posibles reacciones que dan sulfato-aluminatos de calcio hidratados tienen en común la presencia del ión  $Al^{3+}$  (en coordinación diversa, pero casi siempre con precaria estabilidad termodinámica y por tanto mas o menos activos,  $Al_2O_3^-$ , o reactivos  $Al_2O_3^-$ , o superactivos,  $C_3A$ ,  $CA$ , etc.), no existiendo requisito alguno en cuanto a los orígenes o fuentes de tal ión (81), por lo que un modo de evitarlas podía ser sustituyendo lo mas posible en el clinker portland matriz la presencia de tal ión  $Al^{3+}$  (como  $C_3A$ ) por  $Fe^{3+}$  (como  $C_4AF$  y/o  $C_2F$  y/o s.s. de ambos), que al hacerse químicamente, constituiría en su día el fundamento de la génesis, creación y puesta punto de los actuales cementos portland resistentes al ataque de los iones sulfato, ó PY (tipo V USA).

Y ese mismo fundamento de sustituir  $Al^{3+}$ , en forma de  $C_3A$ , pero esta vez en las pastas, morteros u hormigones de cemento portland, por  $Si^{4+}$  y/o  $Fe^{3+}$ , en forma reactiva, o sea,  $SiO_2^-$  y/o  $Fe_2O_3^-$ , respectivamente, mediante puzolanas apropiadas añadidas a aquellos, es el que sustenta la realización de este trabajo.

7<sup>o</sup>.- Mostrar cierta dudas sobre la idea generalizada existente de que la presencia de  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  en el medio "hidroliza" la ettringita que se forme o pueda formar en el mismo (141), lo cual da paso a tener que aceptar la posibilidad de que los compuestos endurecedores tobermoríticos mas o menos gelificados que la  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  llega a formar, puedan impedir, en mayor o menor medida, según los casos, y de algún modo -actuación a modo de "impermeable" ó "cubierta" ó "barrera" protectoras-, el posible trasiego iónico necesario y suficiente para formar ettringita, o bien la expansividad de ésta -merced a la posible acción de "almohadilla" de tales geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2^{\text{r-}}}$ ; no habiéndose pretendido ni planteado, lógicamente, en el presente trabajo -de tesis para alcanzar el grado de Doctor en QUIMICA INDUSTRIAL-, como objetivo el averiguar detalladamente el modo de actuación aunque los resultados del mismo apoyen mas a una hipótesis que a otra, las cuales,

- o bien han surgido del estudio bibliográfico, véase la pag. 103,
- o bien han surgido de este trabajo como se verá en las interpretaciones VIII.1.2.2.1 (E)(F) (L-A) y VIII.2.2.2.1 (E) y 2 (ASTM C 452) venideras.

8<sup>o</sup>.- Esperar la no existencia de sulfato-silicatos de calcio hidratados al igual que sus homólogos de aluminio, ettringita y/o Fase AFm, de 12 ó 18 moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ , o al menos de que si existiesen aquellos que no sean de un carácter disruptivo como éstos.

9<sup>o</sup>.- Aceptar, por probado experimentalmente, que la formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados expansivos, es función directa, entre otros, del contenido potencial de  $\text{C}_3\text{A}$  calculado de un cemento portland, sea o no resistente al ataque de los iones sulfato, no afectando en su comportamiento final, el estado mas o menos cristalino (cúbico, monoclinico u ortorrómbico), y/o mas o menos vítreo, de aquel.

10<sup>o</sup>.- Aceptar igualmente que el trióxido de aluminio, "alúmina",  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , de una puzolana y en especial la reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , puede formar sulfato-aluminatos de calcio hidratados expansivos cuando concurren las condiciones físico-químicas necesarias y suficientes para ello, las cuales suelen coincidir con las existentes en los hormigones tradicionales de cemento portland sean o no resistentes al ataque de los iones sulfato. Por lo tanto al existir una relación directa entre ambos  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  < > ettringita formada, la cantidad de esta última originada de aquellas es a su vez inversa de los contenidos de sílice  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ , y/u óxido férrico,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , reactivos, constitutivos también de la misma.

11°.- Aceptar con Turriziani (196), Kurdowski (203), y Mehta y Wang (262), la no equivalencia, cuando se sustituyen equimolecularmente, entre el aluminato tricálcico del clinker de un cemento portland y la alúmina reactiva,  $Al_2O_3^{r-}$ , de una puzolana.

12°.- De acuerdo con los fundamentos generales anteriores aceptar que la elevada resistencia, o no, al ataque de los iones sulfato de determinados cementos portland y puzolánicos deberá depender por lo tanto del total de aluminatos de calcio hidratados de origen aluminato tricálcico,  $C_3A$ , para los portland, y aluminato tricálcico de la fracción portland y/o alúmina reactiva,  $Al_2O_3^{r-}$ , de la fracción puzolana, para los puzolánicos, así como de la concentración de hidróxido de calcio,  $Ca(OH)_2$ , presente en el medio en el momento del ataque sulfático. Este fundamento coincide básicamente con lo afirmado al respecto por Mehta (216), con la única diferencia de que él hablaba que la elevada, o no resistencia del cemento al ataque sulfático depende "del total de aluminatos "super-activos",  $C_3A$ , existentes en el portland ó puzolánico correspondiente", en lugar del  $C_3A$  del portland y de la  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana que le acompañe, como piensa el autor de este trabajo.

13°.- Aceptar las explicaciones dadas por Lapoujade y Vogein (167) -véase el apartado VIII.2.1. venidero, pág. 307 y siguiente -, sobre el mecanismo de formación a temperatura ambiente de los diversos geles tobermorfíticos de origen Diatomea, e Hidróxido de Calcio en disolución acuosa; así como la evolución constitutiva de los mismos- los geles  $CSH_{SiO_2}^{r-}$  y la morfología del frústulo de la propia Diatomea- durante el transcurso del tiempo de contacto entre tales reactivos.

Y no aceptar en cambio las dadas por Hana e Inque (168) puesto que las elevadas temperaturas, de 70°C a 100°C, a las que consiguieron formar tobermoritas cristalinas, no se han empleado en este trabajo, y si en cambio la propia del laboratorio, de 18°C a 25°C, fijada en ocasiones en 21°C  $\pm$  2°C cuando se hizo necesario, según la normativa del caso.

#### VI.1.1.- Fundamentos Teóricos

##### VI.1.1.1.- Principales

1º.- En función de los objetivos de este trabajo y de los Fundamentos Generales, 6º, 7º, 8º y 9º, anteriores, se estableció como "HIPOTESIS DE TRABAJO" ó "HIPOTESIS MOTRIZ" de este trabajo, la siguiente:

Considerar que en los cementos de mezcla normalizados PA y PUZ, constituidos únicamente por Cemento Portland y Puzolana(s), el auténtico efecto de "algunas" puzolanas de :

(A) Mejorar ó aumentar la resistencia al ataque de los iones sulfato de los cementos P ó PY solos ó matrices, es consecuencia directa del simple efecto FISICO, y QUIMICO en su caso, que su porcentaje, en peso, de sustitución (mejor, quizás, "suplantación", según Calleja 263)?, por aquél, y la especial y/o particular composición química de las mismas en tal caso, ejercen sobre todo el nuevo conjunto o cemento de mezcla normalizado PA ó PUZ ó PYZ, que se origine, a saber:

(a) Por efecto de simple sustitución o suplantación física,

a igualdad de peso, de cemento P ó PY, base ó matriz,

por puzolana: Dado que generalmente, una puzolana está constituida, como se ha dicho en pasajes anteriores, por:

- una fracción reactiva, generalmente amorfa y/o vítrea,
- una fracción menos reactiva o simplemente activa, generalmente amorfa y/o vítrea y
- una fracción nada reactiva y/o activa y mal llamada INERTE, generalmente bastante mas cristalina que las dos anteriores,

tales fracciones al sustituir, en igualdad de peso, parte del cemento P ó PY base o matriz, con el que se mezclan, hará que aquella actúe de "diluyente" ó "dispersante" del mismo, de tal modo que por unidad de peso y volumen, el nuevo cemento de mezcla normalizado originado PA ó PUZ, así como también su posible hormigón correspondiente, contendrá menor porcentaje de fracción portland y por lo tanto de  $C_3A$ , y ya se sabe por la conclusión IV.3, 1º, que a menor contenido total de  $C_3A$  por



unidad de peso y/o volúmen, habrá una menor formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados y con ello menor efecto expansivo y/o disruptivo en su caso, con lo que finalmente se deberá de ver aumentada la resistencia sulfática del cemento portland matriz. En definitiva a la puzolana añadida se le considera que actúa en teoría, simplemente como un  $INERTE_{RS}$  ó similar.

Por todo lo cual a esta acción protectora y/o beneficiosa de la puzolana, actuando como un simple inerte  $_{RS}$  ó similar, sobre el cemento portland matriz, en principio, se la puede denominar:

Aumento de la resistencia sulfática de un cemento portland, mediante su sustitución o suplantación simplemente FÍSICA, en igualdad de peso, por "alguna" puzolana,

teniendo que imperar finalmente sobre la formación de ettringita, el efecto químico INVERSO de la sustitución física de cemento P ó PY matriz por puzolana o efecto químico INVERSO a secas, actuando la misma hipotéticamente sólo como  $INERTE_{RS}$ , es decir, a mas puzolana añadida menos ettringita formada.

- (b) Por efecto de simple sustitución o suplantación físico-química, a igualdad de peso, de cemento P ó PY base o matriz por puzolana: Teniendo en cuenta los datos aportados por Ferrari, Venuat y Papadakis, Massazza, Sersale, Taylor y Venhasselt, véase apart. IV.5.1.4<sup>a</sup>, así como también las exigencias químicas de la norma norteamericana ASTM C 595-76 (155), sobre el probable campo de variabilidad y/o limitaciones en la composición química de una puzolana y más concretamente en lo que a la suma de los porcentajes de sus "factores hidráulicos,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$ " se refiere, que no debe de sobrepasar el valor del 70%, así como sus posibles y reales valores extremos de todos y cada uno de tales sumandos, la puzolana o puzolanas en cuestión se podrían clasificar en función del notable mayor contenido de uno de tales sumandos sobre los otros dos, del siguiente modo:

- si toda o la mayor parte de su constitución química fuera sílice reactiva y/o activa, se denominarían "SILICICAS",
- si toda o la mayor parte de su constitución química fuera alúmina reactiva y/o activa, se denominarían "ALUMINICAS", y
- si toda o la mayor parte de su constitución química fuera óxido férrico reactivo y/o activo, se denominarían "FERRICAS".

habiendo de ser la práctica real y/o de laboratorio la que dictamine en su momento y en función de unos parámetros determinados, la cuantía de cada contenido respectivo, en cada caso citado (los cuales no serán jamás coincidentes, siendo únicamente en el primer caso, puzolana "silícica", en el que su contenido de  $\text{SiO}_2$ , que supera en ocasiones el 60%, puede ser notablemente superior al de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y al de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , pero no ocurriendo jamás lo contrario con respecto a cada uno de estos dos últimos óxidos, ya que si tal ocurriera, desde el punto de vista de la Química Industrial, sería muchísimo más rentable su utilización como materia prima de sus metalurgias extractivas respectivas, del Aluminio y del Acero, y no en la industria de cemento).

Pues bien, según todo ello, y en vista de que todas las posibles reacciones existentes de formación de sulfato-aluminatos de calcio hidratados, tienen de común la presencia o aporte ineludible del ión  $\text{Al}^{3+}$ , al disminuirlo lo más posible en toda la masa del cemento portland matriz u hormigón correspondiente, merced a su sustitución o suplantación físico-química, a igualdad de peso, de aquél, por ión  $\text{Si}^{4+}$  y/o  $\text{Fe}^{3+}$  - - , en forma de puzolana "silícica" y/o "férrica" respectivamente, cabe suponer que la cuantía de tales reacciones disruptivas, o no, de origen  $\text{C}_3\text{A}$  y/o  $\text{Al}_2\text{O}_3^-$  y/o  $\text{Al}_2\text{O}_3^{2-}$ , disminuya, minimizando así sus posibles efectos nocivos, máxime cuando los sulfato-silicatos y/o sulfato-ferritos de calcio hidratados correspondientes,

- o no existen (como se verá más adelante), caso principalmente de los primeros,
  - o sí existen, caso principalmente de los segundos, no poseen, al parecer, efectos nocivos similares a los de aquellos, al menos en el tiempo.
- Por lo que a esta acción protectora y/o beneficiosa de - "algunas" puzolanas se la puede denominar.

Aumento de la resistencia sulfática de un cemento portland mediante su sustitución o suplantación físico-química, en igualdad de peso, por - "alguna" puzolana.

teniendo que imperar finalmente sobre la formación de ettringita el efecto químico INVERSO de la sustitución física de cemento P ó PY, matriz, por puzolana, ó efecto químico INVERSO, a secas, pero actuando ésta, en este otro caso, como tal, merced a su parte más reactiva, y como INERTE<sup>RS</sup>, merced a su parte menos o nada reactiva. Por lo tanto a más puzolana añadida menos ettringita formada.

Por todo lo cual, y teniendo en cuenta,

- las naturales reservas nacidas como consecuencia de los trabajos de Kalousek y colaboradores (35) sobre las predicciones de vida media de hormigones de cementos PY atacados por iones sulfato, las cuales pueden dar pie a la obtención de buenas conclusiones tecnológicas para el futuro inmediato y próximo, pero no así para el lejano o muy lejano (de 50 años en adelante), y
- el fundamento teórico anterior, en particular su parte (b), este trabajo se ha circunscrito fundamentalmente a la SUSTITUCION FISICO-QUIMICA ABSOLUTA Y RELATIVA DEL ION  $Al^{3+}$  en toda la masa del cemento, bien esté presente como  $C_3A$  de un cemento portland, bien como  $Al_2O_3^{r-}$  y/o  $Al_2O_3^{a-}$  de una puzolana en su caso, por el ión  $Si^{4+}$ , en forma de puzolana "silícica", o al menos de notables "connotaciones silícicas", o al menos bastante más "silícica" que "aluminica", tanto en valor absoluto (entre los respectivos

contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ) como relativo (entre los respectivos cocientes  $\frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Al}_2\text{O}_3}$  ), como se verá en -

su momento, al objeto de que como consecuencia de la misma, el nuevo cemento de mezcla normalizado, ya fuese PA ó PUZ, posea, por unidad de peso y volúmen, menor cantidad absoluta y relativa del ión  $\text{Al}^{3+}$  de la(s) forma(s) de origen citada(s), y evitando con ello la formación de los sulfato-aluminato de calcio hidratados correspondientes de cualquier origen ó etiología.

Y todo ello por conocer, entre otras cosas, que si las expectativas de vida media de hormigones fabricados con los actuales cementos portland resistentes al ataque de los iones sulfato, cementos PY españoles, o tipo V USA (cementos que por otra parte pueden dar bastantes mas sulfatoferritos de calcio hidratado que sulfatoaluminatos correspondientes), son, como se dijo en el Cap. III, inferiores a los 50 años por las razones allí apuntadas, de las de los fabricados con cementos con puzolanas silícicas, no se puede decir otro tanto por no poseer al respecto datos semejantes de los mismos, aunque los existentes, véase Tabla 9, sean bastante alentadores pero por lo común sin causa real o aparente que los justifique.

No obstante y en igual sentido, comprendida y aceptada la "al parecer" menor nocividad inmediata del  $\text{C}_4\text{AF}$  y/o  $\text{C}_2\text{F}$  ( ión  $\text{Fe}^{3+}$  ) que la del  $\text{C}_3\text{A}$  ( ión  $\text{Al}^{3+}$  ) en este campo de la resistencia de los cementos P ó PY al ataque de los iones sulfato, y a diferencia de Turriani, Rfo, Celani, etc., ..., que no emplearon en sus trabajos respectivos mas o menos afines a este, una puzolana "férrica" o al menos con notables "connotaciones férricas" mas que "aluminicas" y/o "silícicas", y si siempre única y exclusivamente una puzolana "silícica", aquí no se ha querido dejar por ello totalmente de lado en la temática general y particular que se debate, a aquella, o sea, a la puzolana "férrica", o mejor aún la pareja "referencial"

de puzolanas "férica" y "aluminica", por lo que se eligieron, como se verá, dos puzolanas, en este caso, cenizas volantes, CV-10 y CV-19, véase Tabla 11, las cuales poseían los contenidos absolutos y relativos de  $\% \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\% \text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3}$  respectivos, antes citados, bastante dispares.

- (B) Empeorar o disminuir, quizás, el grado de RS de los Cementos Portland P ó PY, matrices ó bases, podría ser, quizá, consecuencia directa del simple efecto FISICO-QUIMICO, que su porcentaje, en peso, de sustitución o suplantación física, por áquel y la especial y/o particular composición química de las mismas ejercería notablemente sobre todo el nuevo conjunto o cemento de mezcla normalizado PA o PUZ, o PUZ, que se origine.

Y todo ello alcanzado mediante la adición al cemento P ó PY matriz ó base, de una puzolana, en este caso, "aluminica" o con notables "connotaciones aluminicas" o "mas aluminica" que "silícica" y/o "férica".

Por todo lo cual a esta acción opuesta, a las anteriores y quizá no protectora y/o perjudicial de "alguna" puzolana sobre el cemento P ó PY base, se la podría denominar quizá

Disminución de la resistencia sulfática de un cemento P ó PY, mediante su sustitución o suplantación FISICO-QUIMICA, en igualdad de peso, por "alguna" puzolana.

teniendo que imperar finalmente sobre la formación de ettringita el efecto químico DIRECTO de la sustitución física del cemento P ó PY, matriz, por puzolana, o efecto químico DIRECTO a secas, y por el cual, a mas puzolana añadida mas ettringita formada.

Por lo tanto y en este último caso, a más puzolana "aluminica" añadida, más ión  $\text{Al}^{3+}$  presente (esta vez en forma de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , aportado por aquella), en el nuevo cemento de mezcla normalizado PA ó PUZ, correspondiente, el cual originará más ettringita que la originada por el PY (¿y P?) solos a la hora de su hidratación selenitosa, la cual vendrá a sumarse con la de origen  $\text{C}_3\text{A}$  en su caso, con todas sus probables implicaciones mas o menos disruptivas, pero en cualquier caso desconocidas, siendo ello por tanto objetivo, entre otros, de este trabajo.

2<sup>a</sup>.- En función del 6<sup>o</sup> Fundamento General, se ha tratado de convertir cualquier cemento portland de no elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, en otro nuevo cemento normalizado, PA ó PUZ, cuyo grado de resistencia al citado ataque agresivo fuese mayor o menor, según que a aquél se le añadiera una puzolana "silícica" ó "alumínica", o bien, "férrica" ó "alumínica", respectivamente.

3<sup>a</sup>.- Idem cualquier cemento portland de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato; PY español, fijando muy especialmente la atención en si la coyunda PY-Puzolana "silícica", mostraría, como se deseaba y esperaba, según las hipótesis de trabajo previas, un mayor y mejor grado de resistencia al citado ataque agresivo, que el de su cemento PY base ó matriz, con lo cual se podría confirmar quizás, lo dicho por Kalousek y colaboradores (35) tras sus trabajos, de que los actuales cementos portland de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato no son la última y mejor respuesta al mismo.

4<sup>a</sup>.- Los fundamentos teóricos anteriores, se concretan como se verá de un modo práctico en este trabajo aplicando los métodos acelerados de ensayo, L-A, ASTM C 452-68, ASTM C 452-75 e HIBRIDO-1 y sus especificaciones correspondientes, en su caso, a cada cemento P ó PY solo, de modo y manera que los incrementos porcentuales de diámetro ( $\Delta\phi$ , %), y longitud ( $\Delta L$ , %) respectivamente, amén de otros parámetros, fueran para los nuevos cementos de mezcla resultantes PA ó PUZ, en cada caso, menor o mayor, que los correspondientes a los de los cementos P ó PY base ó matrices correspondientes, según que la puzolana añadida fuera "silícica", o bien, "férrica", ó "alumínica".

#### VI.1.1.2.- Secundarios

1<sup>a</sup>.- Basándose en las limitaciones intrínsecas de aplicabilidad,

- bien fundacionales, en el caso del método L-A, o
- bien específicas, en el caso del método ASTM C 452

que ambos métodos de ensayo poseen para los cementos portland en exclusiva, se trató de ver el grado de validez fundamentado de los mismos y en especial del, ASTM C 452 tal cual (ya fuera la versión C 452-68, o la versión C 452-75) ó modificado, para los cementos PA y/o PUZ, constituidos únicamente por Cemento Portland y Puzolana(s) hasta un 40% en peso de ésta(s) última(s).

- 2º.- Para alcanzar el objetivo (B) y en función de los fundamentos teóricos y del 1º anterior, se trató de CALIFICAR y CLASIFICAR, al igual que sucediera en su momento con los cementos portland y mediante métodos de ensayo, a los cementos PUZ, y a las puzolanas en función de su grado de resistencia al ataque de los iones sulfato, puesto que por su diverso contenido posible de  $C_3A$  y  $Al_2O_3^-$  y  $Al_2O_3^-$  sólo, respectivamente, pueden formar distinta cantidad de sulfato-aluminatos de calcio hidratados mas o menos expansivos, manifestables externamente, bien en un sistema constituido por pasta, método L-A, bien en un sistema constituido por mortero, métodos ASTM C 452 e HIBRIDO-1, por distintos incrementos porcentuales de diámetro ó longitud respectivos en función del tiempo.
- 3º.- A tenor de lo que se obtuviere en los dos puntos anteriores y si el resultado daba positivo para cementos puzolánicos además de para los respectivos portland matrices, quedaba implícita la validez de ambos métodos acelerados de ensayo para los cementos de mezcla PA correspondientes o no, es decir, que éstos últimos podrían también de este modo ser calificados y clasificados, mediante los métodos acelerados de ensayo antes citados, al igual que sus "progenitores", los cementos P ó PY matrices, y "hermanos mayores", los cementos PUZ.
- 4º.- Una vez aplicado el método ASTM C 452-68, por las razones que se verán en su momento, a cada cemento P y PY base o matriz, emplea-do en este trabajo, sus respectivos incrementos porcentuales de longitud producidos a la edad de 28 días de sus probetas, habrían de coincidir básicamente con los de la Tabla 31 obtenidos por Biczok (142) del Bull. ASTM N° 212 de 1956 (208), y a partir de ahí lo que se trató seguidamente fué de sustituir normativamente parte de cada cemento P ó PY base o matriz por:
- una puzolana "silícica" para que el o los nuevos cementos de mezcla PA ó PUZ obtenidos, dieran, a igualdad de tiempo de hidratación, un menor incremento porcentual de la longitud ( $\Delta L, \%$ ) ó diámetro ( $\Delta \phi, \%$ ) que su P ó PY base o matriz, al aplicarles cualquiera de los cuatro métodos elegidos, y en especial los normalizados por ASTM, habiendo de ser tanto menor el incremento porcentual de longitud ( $\Delta L, \%$ ) ó de diámetro ( $\Delta \phi, \%$ ) originados, cuanto mayor fuera el porcentaje de sustitución normalizada, ó

- una puzolana "aluminica", para todo lo contrario,

Con lo cual y de esta manera con unas puzolanas "referenciales" dadas se trató de disminuir o aumentar, respectivamente, los incrementos porcentuales de longitud o diámetro de sus respectivos P o PY base o matrices, es decir, mejorar o aumentar, ó todo lo contrario, su resistencia potencial al ataque de los iones sulfato, esto es, conocidas de antemano, por selección y elección razonadas las puzolanas "referenciales" preveer y orientar con fundamento y provechosamente al caso, los nuevos incrementos porcentuales de longitud o diámetro de los cementos P ó PY base o matrices, pero ya en forma de nuevos PA ó PUZ normalizados, y constituidos únicamente por Cemento Portland y Puzolana(s).

5º.- De igual modo, pero al revés, se operó como se verá, con el resto de las puzolanas utilizadas en este trabajo, N, O, A, C, CV-10 y CV-19, (estas dos últimas mas limitadamente, sólo con el P-31, por las razones apuntadas en el Cap.III y Fund.Tco.Fb) pero esta vez mezcladas respectivamente, en las proporciones en peso antes citadas 80/20 y 60/30 y 60/40, sólo con los cementos P-1 y/o P-2 y/o P-31 y/o PY-4 y/o PY-6, al objeto de que una vez conocido el comportamiento de los cementos matrices citados sólo, ante el ataque de los iones sulfato, determinar el "carácter" o "influencia" de la puzolana que le acompañe en cada caso, mediante los respectivos incrementos porcentuales de longitud o de diámetro de los correspondientes cementos de mezcla, PA y PUZ, sin mas que compararlos, a igualdad de tiempo de hidratación, con los de los cementos P y/o PY base ó matrices antes citados.



VI.1.2.- Fundamentos Prácticos.

VI.1.2.1.- Selección de Materiales

VI.1.2.1.1.- Razones Cualitativas y Cuantitativas de la misma.

Los materiales seleccionados para la realización de este trabajo han sido los siguientes:

- (A) Cementos Portland Industriales de elevada resistencia, ó no, al ataque de los iones sulfato: seis P y seis PY, cuya notación numerada correspondiente figura en la Tabla 11,
- (B) Cementos Pozolánicos Industriales: ocho, cuya notación numerada correspondiente figura en la Tabla 11,
- (C) Pozolanas: ocho, de las cuales cinco son "naturales" y tres "artificiales", cuya notación numerada correspondiente figura en la Tabla 11,

VI.1.2.1.1.- Razones cualitativas y cuantitativas de la misma:

- (A) De los Cementos Portland: Se eligieron los suficientes y necesarios para tratar de alcanzar los diferentes objetivos de este trabajo, pero de modo y manera que,
  - el contenido de  $C_3A$  de los mismos quedara dentro del entorno de variabilidad del 15,0% al 0,0%, en el cual suelen estar comprendidos prácticamente todos los cementos portland, y que
  - relativamente hubiera mas de contenido de  $C_3A$  menor del 5,0% (6 PY), que mayor del 5,0% (6 P).
- (B) De los Cementos Pozolánicos: En función del objetivo que trata sobre la posibilidad, ó no, de aplicación de los métodos acelerados de ensayo ASTM C 452-68 y/o ASTM C 452-75 a los cementos PA y/o PUZ industriales, se trató de confirmar tal posibilidad mediante ensayos previos realizados con cementos PA y PUZ, de laboratorio, preparados con cementos P ó PY puros ó matrices, y pozolanas D, N, O, A, C y M, seleccionados, elegidos y empleados todos ellos para este trabajo, para que como consecuencia de las conclusiones que se obtuviesen con estos, PA y PUZ citados, tratar de confirmarlás con cementos de mezcla PUZ industriales. A tal fin se eligieron de estos últimos ocho cementos.
- (C) De las Pozolanas: Según los objetivos citados en el Capítulo V y el fundamento práctico 1º, se han seleccionado tres sub-familias de pozolanas:

- 1ª.- Subfamilia de origen orgánico.
- 2ª.- Subfamilia de origen inorgánico o puzolanas naturales.
- 3ª.- Subfamilia de origen tecnológico o industrial, o puzolanas artificiales de modo y manera que:

1ª.- Dada su composición química general, se pudiera disponer en cierta medida, de sendos ejemplos concretos de casos extremos, o al menos con connotaciones notables en tal sentido, es decir, se pudiera disponer de:

- una puzolana eminentemente "silícica", y/o afín
- una puzolana eminentemente "aluminica", ó afín
- una puzolana eminentemente "férrica", ó afín

2ª.- Dados los fines de este trabajo, se pudieran "emparejar" de modo que "actuaran", ó "se considerasen" como "referenciales", ó "de referencia", ó "de patronazgo", en el bien entendido de que en función de la temática que se estudia, así como de las posibilidades combinatorias existentes "anti-expansivo"- "pro-expansivo", por ataque sulfático, se podrían combinar formándose al efecto:

- a) un subconjunto o "pareja", "silícica"- "aluminica", y
- b) un subconjunto o "pareja", "férrica"- "aluminica", ó similar,

no habiendo necesidad, lógicamente, de preparar una tercera pareja, ésta "silícica"- "férrica", porque demostrada en todo o en parte la validez de las dos primeras, quedaría implícitamente demostrada la utilidad científica y tecnológica de la última.

Según todo ello y entrando ya en materiales específicos y concretos, se han elegido:

- a) como puzolana(s) "silícica(s)", dos puzolanas naturales de origen orgánico:

- una diatomita, D, purificada y calcinada (clase Merck), véase Tabla 11, y
- una diatomita, natural, N o Kieselgur o Pseudokieselgur, española, véase Tabla 11, pero empleándose como "referencial silícica", la puzolana D.

- b) como puzolana(s) "aluminica(s)", dos puzolanas silicoaluminosas artificiales españolas:

- un metacaolín cuarzoso, M, véase Tabla 11, y  
 - una ceniza volante, de "Módulo de Fundentes ALTO", la CV-10, véase Tabla 11, pero empleándose como "referencial aluminica", la puzolana M, c) como puzolana "ferrica", o bastante mas "ferrica" que "aluminica", una puzolana silicoaluminosa artificial española de "Módulo de Fundentes BAJO", la CV-19, véase Tabla 11, y relacionada por su origen únicamente ( $Al_2O_3$  (%) +  $Fe_2O_3$  (%)) con la CV-10 anterior.

No obstante y al objeto de abarcar y completar lo mas posible, al igual que ocurriere anteriormente con la gama de cementos P y PY elegida, todo el campo de variabilidad fisio-química existente entre los extremos "silícico" y "aluminico" de la pareja o subconjunto "silicia"- "aluminica", se eligieron además otras puzolanas españolas naturales empleadas comunmente por la industria cementera nacional, que fueren la O, A y C, véase Tabla 11.

A todas ellas, una vez conocido el grado de efecto protector ó "anti-sulfato" de cada una de las puzolanas "referenciales"- "silicia", "aluminica" y "ferrica"- utilizadas, se les aplicó el mismo tratamiento agresivo que a aquellas.

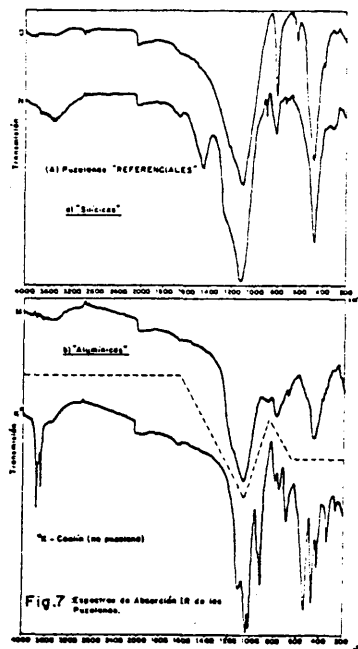


Fig. 7 Espectros de Absorción IR de las Puzolanas.

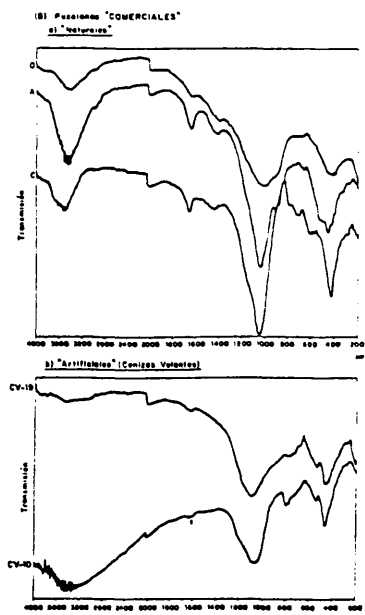


Fig. 8 Espectros de Absorción IR de las Puzolanas.

VI.1.2.1.2.- Análisis, Definición y Estudio, en su caso, de los diversos materiales seleccionados para la realización de este trabajo

1º.- Características de los CEMENTOS:

(a) Composición Química: Los resultados obtenidos del análisis químico cuantitativo de cada uno de los cementos seleccionados para la realización de este trabajo, se encuentran agrupados ordenadamente en la Tabla 11. De los mismos se han de hacer las aclaraciones adicionales siguientes, además de las ya realizadas en el margen inferior de aquella:

- 1.- El análisis químico de los cementos portland P, portland resistentes al yeso, PY, portland con adiciones activas, PA, y puzolánicos PUZ, empleados en este trabajo, se ha realizado de acuerdo con los métodos analíticos que se encuentran en el vigente Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de los Cementos, RC-75 (1). Los resultados obtenidos figuran en la Tabla 11.
- 2.- El Residuo Insoluble, R.I., de los cementos portland se realizó mediante ataque ácido-básico de ácido clorhídrico diluido, ClH 1:5, y carbonato sódico diluido,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 5%.
- 3.- El Residuo Insoluble, R.I., de los cementos puzolánicos industriales, PUZ, se realizó mediante ataque ácido-básico, con Ácido Clorhídrico diluido de punto de ebullición constante, ClH d=1.104, esto es del 20,24%, e Hidróxido Sódico diluido, NaOH, al 2%.
- 4.- Los contenidos de sodio,  $\text{Na}^+$ , y potasio,  $\text{K}^+$ , se han determinado por fotometría de llama.
- 5.- La Cal Libre, "CaO libre", se ha determinado por el método descrito en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de los Cementos, RC-75 (1).
- 6.- Los resultados obtenidos, expresados como óxidos, excepto la Pérdida por Calcinación, (P.F.) y el Residuo Insoluble, (R.I.), se dan en tanto por ciento (%) en peso; estos resultados están referidos a muestra seca a 105-110 °C, ver Tabla 11.
- 7.- El peso específico real de cada cemento se ha determinado, mediante el ensayo correspondiente descrito, en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de los Cementos, RC-75 (1).



(b) Otros Resultados: A partir de los valores de la composición química de los cementos portland se ha determinado, mediante cálculo, con las fórmulas de Bogue, la Composición Potencial de cada uno de los tales cementos, la cual se encuentra en la Tabla 11. No obstante una vez realizados tales cálculos y ante la composición potencial normalizada, pero poco común, detentada por el cemento PY-6, se creyó oportuno además realizarle un tratamiento con salicílico-metanol, método de Takashima (283), al objeto de separar, por insolubilización, los diversos compuestos con fases aluminatos -que acompañan normalmente a los silicatos-, los cuales fueron seguidamente detectados mas facilmente por DRX, como lo confirma la Figura nº 6, adjudicándosele el valor aproximado del 1,0% de  $C_3A$  al objeto de ser tenido en cuenta cuando conviniera a lo largo de este trabajo.

Así mismo se han determinado también los Módulos de Silicatos, Fundentes y Standard de Cal de cada uno de ellos, e igualmente además determinados Indices utilizados en la industria del cemento.

(c) Otras determinaciones: El Indice de Puzolanidad de los cementos de mezcla PA, PUZ y PUZ se ha determinado mediante el ensayo de puzolanidad, según Frattini, descrito en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de los Cementos, RC - 75 (1).

El ensayo está normalizado y es obligatorio para los cementos puzolánicos, de aquí que se le haya realizado a todos los correspondientes "de laboratorio" ó "industriales", empleados en este trabajo.

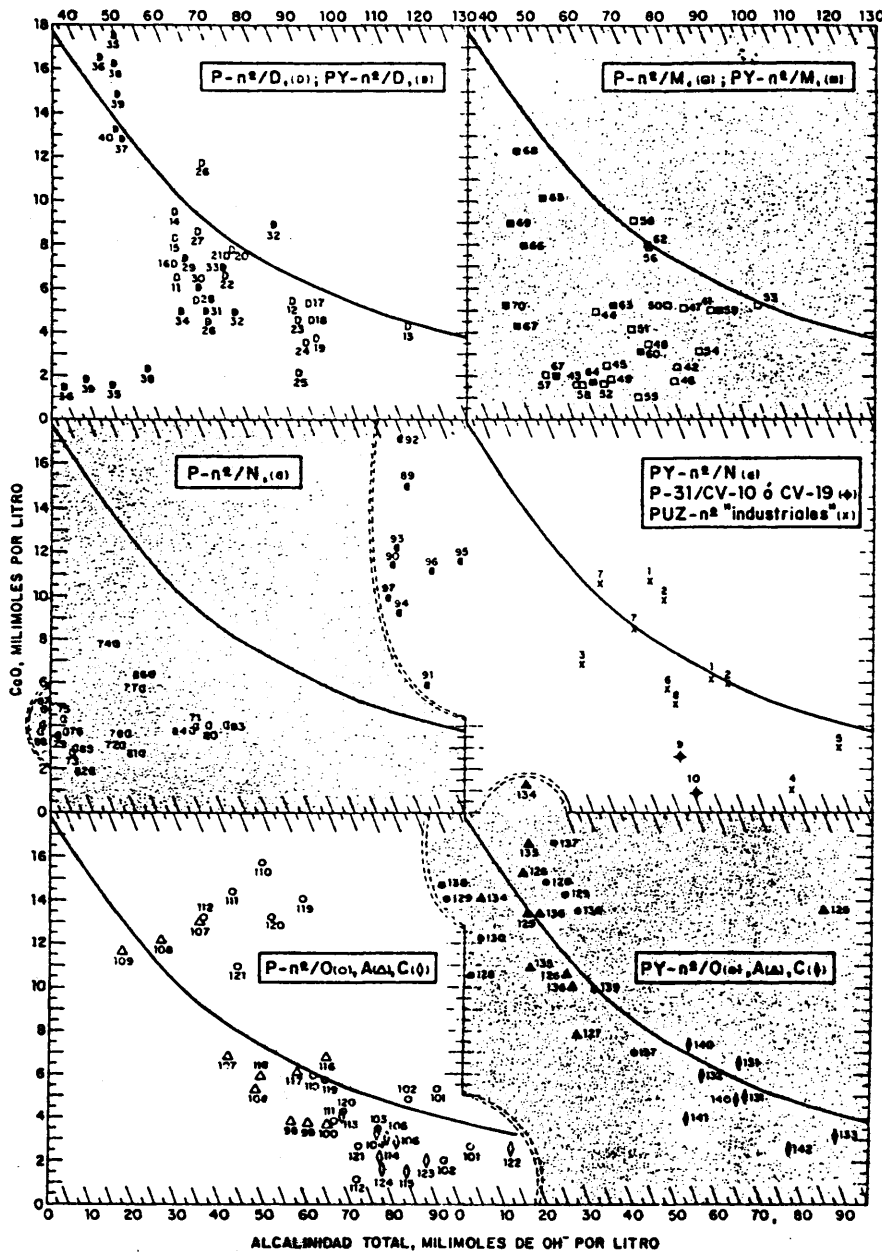
Asi mismo, este ensayo se ha realizado también a todos los cementos portland con adiciones activas, PA, preparados con cada uno de los cementos portland resistentes o no al ataque sulfático, 80 % en peso, y 20 % en peso de puzolana, empleados en este trabajo, no estando normalizado el mismo para tal tipo de cementos.

Los resultados obtenidos se encuentran en la Fig. 4 y Tablas 12 y 13. No obstante dada la posible, ó no, relación existente entre tales resultados, y los que se obtuvieren de los cementos de mezcla PA y PUZ en las fases posteriores de este trabajo, se va a realizar el estudio y discusión detallada de los mismos al objeto de obtener las conclusiones correspondientes.

Figura 4

ENSAYO DE PUZOLANICIDAD, SEGUN FRATINI

ALCALINIDAD TOTAL, MILIMOLES DE OH<sup>-</sup> POR LITRO



NOTA 1.-Según el criterio del Pílogo RC-75, un cemento se considera puzolánico cuando el punto representativo del resultado del ensayo de puzolanicidad, bien a la edad de 7 días o a la edad de 28 días, se sitúa por debajo de la curva del gráfico (curvas de solubilidad de la cal - CaO - en presencia de dióxido).

NOTA 2.-La denominación de cada punto se encuentra en la TABLA 12.

TABLA 12

ENSAYO DE PUZOLANICIDAD SEGUN FRATINI									
DENOMINACION DE CADA PUNTO REPRESENTADO EN LA FIGURA		CANTIDAD DE PUZOLANA EN EL CEMENTO DE MEZCLA PA O PUZ		CANTIDAD DE CEMENTO EN EL CEMENTO DE MEZCLA PA O PUZ		CANTIDAD DE AGUA EN EL CEMENTO DE MEZCLA PA O PUZ		CANTIDAD DE AGUA EN EL CEMENTO DE MEZCLA PA O PUZ	
1	P-1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	P-2	100	100	100	100	100	100	100	100
3	P-3	100	100	100	100	100	100	100	100
4	P-4	100	100	100	100	100	100	100	100
5	P-5	100	100	100	100	100	100	100	100
6	P-6	100	100	100	100	100	100	100	100
7	P-7	100	100	100	100	100	100	100	100
8	P-8	100	100	100	100	100	100	100	100
9	P-9	100	100	100	100	100	100	100	100
10	P-10	100	100	100	100	100	100	100	100
11	P-11	100	100	100	100	100	100	100	100
12	P-12	100	100	100	100	100	100	100	100
13	P-13	100	100	100	100	100	100	100	100
14	P-14	100	100	100	100	100	100	100	100
15	P-15	100	100	100	100	100	100	100	100
16	P-16	100	100	100	100	100	100	100	100
17	P-17	100	100	100	100	100	100	100	100
18	P-18	100	100	100	100	100	100	100	100
19	P-19	100	100	100	100	100	100	100	100
20	P-20	100	100	100	100	100	100	100	100
21	P-21	100	100	100	100	100	100	100	100
22	P-22	100	100	100	100	100	100	100	100
23	P-23	100	100	100	100	100	100	100	100
24	P-24	100	100	100	100	100	100	100	100
25	P-25	100	100	100	100	100	100	100	100
26	P-26	100	100	100	100	100	100	100	100
27	P-27	100	100	100	100	100	100	100	100
28	P-28	100	100	100	100	100	100	100	100
29	P-29	100	100	100	100	100	100	100	100
30	P-30	100	100	100	100	100	100	100	100
31	P-31	100	100	100	100	100	100	100	100
32	P-32	100	100	100	100	100	100	100	100
33	P-33	100	100	100	100	100	100	100	100
34	P-34	100	100	100	100	100	100	100	100
35	P-35	100	100	100	100	100	100	100	100
36	P-36	100	100	100	100	100	100	100	100
37	P-37	100	100	100	100	100	100	100	100
38	P-38	100	100	100	100	100	100	100	100
39	P-39	100	100	100	100	100	100	100	100
40	P-40	100	100	100	100	100	100	100	100
41	P-41	100	100	100	100	100	100	100	100
42	P-42	100	100	100	100	100	100	100	100
43	P-43	100	100	100	100	100	100	100	100
44	P-44	100	100	100	100	100	100	100	100
45	P-45	100	100	100	100	100	100	100	100
46	P-46	100	100	100	100	100	100	100	100
47	P-47	100	100	100	100	100	100	100	100
48	P-48	100	100	100	100	100	100	100	100
49	P-49	100	100	100	100	100	100	100	100
50	P-50	100	100	100	100	100	100	100	100

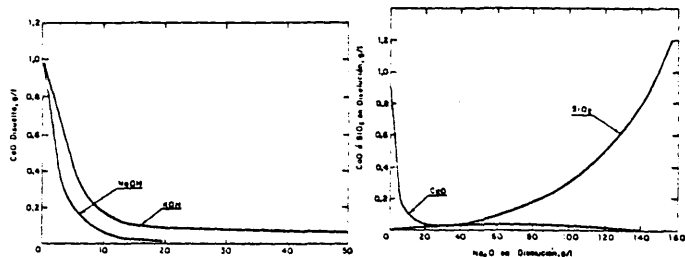


FIG. 5 - SOLUBILIDAD DEL  $Ca(OH)_2$  EN DISOLUCION ALCALINA DE  $NaOH$  Y  $KOH$ . (W. Larch)

\* CANTIDADES DE  $Na_2O$ ,  $CaO$ , Y  $SiO_2$  EN LOS FILTRADOS DE MEZCLAS DE  $Ca(OH)_2$  SOLIDO Y GELES DE SILICATO DE  $Ca$  Y  $Na$  (G. Kalkreuth)

TABLA 13

CONTENIDOS DE $Na^+$ Y $K^+$ (EXPRESADOS COMO $Na_2O$ Y $K_2O$ ) EN LA FASE LIQUIDA DEL ENSAYO DE "Fratini" APLICADO A DISTINTOS CEMENTOS DE MEZCLA PA Y PUZ PREPARADOS CON LAS PUZOLANAS C6M, RESPECTIVAMENTE									
Cementos de Mezcla PA y PUZ :									
NOTA: $Na_2O$ y $K_2O$ en g/l	Edad (días)	P-1/C		P-1/M		P-2/C		P-2/M	
		$Na_2O + K_2O$	$Na_2O + K_2O$	$Na_2O + K_2O$	$Na_2O + K_2O$	$Na_2O + K_2O$	$Na_2O + K_2O$	$Na_2O + K_2O$	$Na_2O + K_2O$
	7	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2
	28	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2
	7	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2
	28	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2
	7	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2
	28	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2
	7	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2
	28	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2
	7	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2
	28	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	11.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2



Discusión VI.1.2.1.2 (c)

Antes de entrar en el estudio de los resultados obtenidos en este ensayo, y para facilitar la discusión de los mismos, con todos los cementos de mezcla PA y PUZ anteriores se va a realizar previamente cinco agrupaciones diferentes, a saber:

- Agrupación E: La llevada a cabo con aquellos cementos de mezcla PA y PUZ (80/20, 70/30 y 60/40) preparados con las puzolanas referenciales D ó M y cada uno de los cementos P ó PY matrices o puros siguientes, P-1, P-2, P-4, P-32, P-31, P-5, PY-5, PY-1, PY-4 ó PY-6.
- Agrupación F: La llevada a cabo con aquellos cementos de mezcla PA y PUZ (80/20, 70/30 y 60/40) preparados con las puzolana N, comparándola con las D y M y cada uno de los cementos P ó PY siguientes, P-1, P-2, P-4, P-32, P-31, P-5, PY-5, PY-1, PY-4 ó PY-6.
- Agrupación G: La llevada a cabo con aquellos cementos de mezcla PA y PUZ (80/20, 70/30 y 60/40) preparados con las puzolanas D, N, O, A, C ó M y cada uno de los cementos P ó PY siguientes, P-1, P-2, P-31, PY-4 ó PY-6.
- Agrupación H: La llevada a cabo con los cementos de mezcla PUZ (70/30) preparados con las puzolanas D, N, C, A, C, M, N-10 ó N-19 y el cemento P-31.
- Agrupación I: La llevada a cabo con los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con las puzolanas D, N, O, A, C y M y los cementos PY-4 y PY-5, respectivamente.

Y la discusión de tales resultados es como sigue:

- De la Agrupación E:

- a) Ca<sup>2+</sup> en la fase líquida: En general se puede decir que a igualdad de cemento de mezcla la concentración del Ca<sup>2+</sup> en la fase líquida disminuye con diferencias no uniformes de la puzolana D a la M excepto en los cementos de mezcla 80/20 preparados con los cementos matrices P-1 ó P-31 en donde ocurre, con ligeras diferencias, todo lo contrario.
- b) Alcalinidad en la fase líquida: Se puede decir otro tanto de lo dicho anteriormente, con la única excepción en este caso de los cementos de mezcla 80/20 preparados con el cemento portland matriz P-31.

- De la Agrupación F:

- a) Ca<sup>2+</sup> en la fase líquida: En general, se puede decir que, a igualdad de edad y cemento de mezcla, la concentración de Ca<sup>2+</sup> en la fase líquida disminuye, con diferencias no uniformes, de la puzolana D a la M pasando

por la N (116 casos de un total de 126 cumplen esta generalidad), cumpliéndose más claramente este hecho conforme aumenta el porcentaje de puzolana añadida.

- b) Alcalinidad en la fase líquida ( $\text{OH}^-$ ): En general se puede decir que a igualdad de cemento de mezcla, la Alcalinidad de la fase líquida disminuye, con diferencias no uniformes, de la puzolana D a la N pasando por la M, excepto en los cementos de mezcla 80/20, preparados con el cemento portland matriz P-31, y 60/40, preparado con el cemento portland matriz P-2, en los que el orden es M, D, N.

- De la Agrupación G:

- a)  $\text{Ca}^{2+}$  en la fase líquida: En este caso no existe generalidad manifiesta alguna a no ser que se aprecie en sentido aproximado como tal el considerar,
- por un lado a las puzolanas M y C, generalmente en el orden citado, como las que menos  $\text{Ca}^{2+}$  dejan libre en el medio líquido,
  - por otro lado al resto de las puzolanas, en orden diferente de un cemento matriz a otro, como las que mas.
- b) Alcalinidad en la fase líquida ( $\text{OH}^-$ ): En este caso ocurre lo mismo que en el anterior, es decir, que ante la ausencia de generalidad manifiesta alguna, se puede considerar en sentido aproximado como tal,
- por un lado a las puzolanas M y N, generalmente en el orden citado, como las que menos alcalinidad permiten en el medio,
  - por otro lado, al resto de las puzolanas, en orden diferente de un cemento matriz a otro, como las que mas.

- De la Agrupación H:

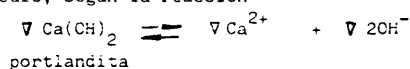
- a)  $\text{Ca}^{2+}$  en la fase líquida: En este caso tan concreto la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  disminuye de la puzolana CV-19 a la CV-10.
- b) Alcalinidad en la fase líquida ( $\text{OH}^-$ ): En este caso ocurre todo lo contrario que en el anterior apartado a) es decir que la alcalinidad disminuye de la puzolana CV-10 a la CV-19.

Interpretación VI.1.2.1.2 (c)

- De la agrupación E:

Tanto la fracción vítrea de la puzolana D, como la amorfa de la M, de sus componentes químicos reactivos correspondientes, en especial el  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de esta última, deben de jugar un papel importantísimo en la fijación del ión  $\text{Ca}^{2+}$  para dar comúnmente geles tobermoríticos diversos ambas, aunque bastante mas la primera, y compuesto de Strätling y aluminatos de calcio hidratados diversos, la segunda, pues ambas son las dos características diferentes de tales puzolanas que pueden dar pie a la existencia de tal discrepancia en la cantidad fijada de  $\text{Ca}^{2+}$  por las mismas, favorable con mucho a la segunda.

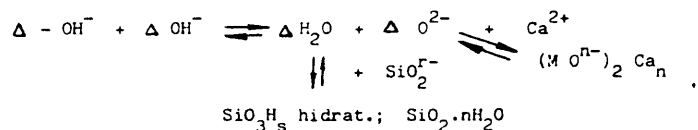
Indudablemente ello ha de acarrear idéntica relación con alcalinidad, puesto que si en un cemento en estado de hidratación, el ión  $\text{Ca}^{2+}$  está mayoritariamente como portlandita, al disminuir de la fase líquida dicho catión al ser fijado por la puzolana, habrá de disminuir también la alcalinidad de dicho medio, según la reacción



- De la agrupación F:

En este caso no se puede decir otro tanto al del anterior en cuanto a la fijación de  $\text{Ca}^{2+}$  de la fase líquida, y entrando en detalle se puede decir que la única posibilidad de que la puzolana N, pese a tener algo menos de  $\text{SiO}_2$ , y algo mas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que la D, haya fijado mas  $\text{Ca}^{2+}$  del medio líquido que la D, es que la  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  de la misma y su estado físico ha de ser mayor y por tanto mas reactiva que la de la D, hecho éste nada desdeñable pues mientras la primera, N, se ha utilizado tal cual se recibiera del proveedor, la segunda ha sufrido diversos tratamientos físico-químicos para purificarla, los cuales como es sabido y en especial su incineración controlada, hácenle perder actividad por nucleación de  $\alpha$ -cristobalita, ver Fig. 6 de DRX

Por otra parte y en cuanto a la alcalinidad, se puede decir que quizás la puzolana N, y en cierta medida próxima también la D, sean capaces por su estado físico de fijar además de iones  $\text{Ca}^{2+}$ , iones  $\text{OH}^-$



para dar ácido silícico hidratado el cual es el componente mas característico de aquellos, bien como tal ácido silícico hidratado, bien en forma de ópalo o geiserita.

Una prueba evidente de esta afinidad manifiesta la tiene el que en las gráficas de IR, Fig. 7, de las mismas, D y N, aparecen, entre 3700 y 3000  $\text{cm}^{-1}$  vibraciones de valencia -OH de los grupos, Si-OH y del H-OH, las cuales, en el caso de la puzolana N están mas desplazadas a la derecha que las de la puzolana D, lo cual hace pensar que al ser la puzolana N un producto natural no tratado térmicamente, los grupos OH del Si-OH serán mas numerosos tanto formados o por formar, que los -OH del H-OH, y por tanto tendrán mayor energía de enlace -(señal inequívoca de mayor estabilidad en condiciones ambientales)- y su banda característica aparecer, bastante por debajo de 3600  $\text{cm}^{-1}$ , mientras que la de aquellos existentes en menor cuantía, los OH del H-OH, se encuentran por encima. Esto viene a confirmar que en la puzolana D, tratada térmicamente, ha de ocurrir todo lo contrario, como en realidad ocurre en el mismo rango de frecuencia.

No obstante esa mayor actividad de la puzolana N sobre la D, no puede achacarse con seguridad total y absoluta:

- a) a la mayor vitriedad y/o reactividad de la  $\text{SiO}_2$  en la puzolana N que en la D, ó
- b) a la mayor cantidad de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de la puzolana N (procedente por lo general de impurezas margo-arcillosas de la misma) que de la D (siempre que dicha  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fuere como la de M), pareciendo razonable pensar, que quizás ambas posibilidades participen en mayor o menor cuantía en la citada mayor actividad de la puzolana N sobre la D.

En cuanto a la puzolana M cabe decir otro tanto como en el caso anterior.

#### - De la Agrupación G:

En general se puede destacar en este caso:

- 1º.- Que las puzolanas M y C, por este orden, fijan iones  $\text{Ca}^{2+}$  en cantidades notablemente superiores al resto, por lo que al tener ambas contenidos mayores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y/o M.F.  $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ , que dicho resto, cabe pensar en la posible influencia de los mismos y quizás mayormente su estado físico, en tal hecho. No obstante, causa aparente extrañeza el que el orden de fijación, entre ambas puzolanas, de tales iones  $\text{Ca}^{2+}$ , haya sido en un mayor número de casos, - inversamente proporcional a su contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3(\%)$  y/o M.F.  $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3(\%)}{\text{Fe}_2\text{O}_3(\%)}$

respectivos, y

- directamente proporcional al contenido de componentes alcalinos, como  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , de cada uno de ellas, pese a lo que aparentemente cabía esperar, según lo dicho al principio.

Ello da pie a pensar, en algún sentido, que concretamente tales componentes alcalinos sean el origen y la causa de tal circunstancia aparentemente anómala, debiendo estribar la misma en la ya conocida mayor insolubilidad del  $\text{CaO}$  en soluciones alcalinas de  $\text{NaOH}$  ó  $\text{KOH}$  (25), ver Fig. 5, pues tales componentes alcalinos de la puzolana C, que son bastante mayores que los de la M que los tiene escasos, pasarían a la fase líquida portlandí-tica del ensayo de Fratini impidiendo de este modo la saturación en portlandita de la misma, con lo que, de origen, la puzolana C en el ensayo de Fratini no fijará  $\text{Ca(OH)}_2$  de una disolución saturada o muy próxima a la saturación del mismo, sino de una disolución bastante menor que la saturada porque la presencia conjunta en la misma de los alcalinos antes citados se lo impide, véase Tabla 13. De aquí que a poco que fijare, se podría situar su cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  dejada libre en dicha fase líquida por debajo de la de aquella otra puzolana que pese a tener sus componentes reactivos más adecuados en calidad y cantidad que la C, caso de la M, y haber fijado potencialmente más  $\text{Ca(OH)}_2$ , haya dejado pese a ello más  $\text{Ca(OH)}_2$  libre en la fase líquida, dado que esta última partiría de la saturación en  $\text{Ca(OH)}_2$  de la misma, y aquella la C, no, pues partiría de una disolución que debería estar bastante por debajo de la de saturación (por la ya aludida presencia conjunta en la misma de los alcalinos citados,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ).

Por otra parte y en cuanto a la alcalinidad y su influencia en su mayor o menor cuantía presente, en la fase líquida, de los contenidos de componentes alcalinos de la puzolana correspondiente, cabe decir otro tanto que en el caso anterior, de aquí que sea la puzolana C, (la de mayor contenido de componentes alcalinos por consecuencia de la razón anterior), la que encabece, por lo general, las clasificaciones correspondientes.

Por lo tanto y resumiendo se puede decir que allí han debido de ocurrir al menos, tres fenómenos distintos a un mismo tiempo, derivados todos ellos de un mismo hecho, la aportación a la fase líquida de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  por parte de la puzolana C. Tales fenómenos serían:

- un intercambio iónico de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  por  $\text{Ca}^{2+}$  por parte de la puzolana C, ó "capacidad de cambio" de la puzolana C, (y otro tanto en alguna menor medida con las puzolanas O y CV-10, por contener ambas aproximadamente la mitad de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  que la C),
- un descenso en el valor de la saturación de  $\text{Ca}^{2+}$  de la fase líquida, ante la presencia apreciable de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  en la misma, de origen la puzolana C (O ó CV-10 en su caso), y
- un aumento de la Acalinidad y pH del medio ( $> 12,8$ ) los cuales por lo común han alcanzado los máximos valores respectivos en todos los cementos de mezcla donde estuvo presente en mayor o menor medida esta puzolana C (la O ó CV-10 en su caso), hechos estos últimos ocurridos todos ellos en este trabajo, véase Fig. 4, no siendo de extrañar en absoluto los mismos pues a tal efecto baste recordar que una disolución saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tiene un pH de 12,4, mientras que sendas disoluciones 0,1 N de NaOH ó KOH lo tienen de 14.

Con lo cual ello llevaría aparejado por tanto,

- la cumplimentación rápida y fácil del ensayo de Frattini por parte de la puzolana C, aunque justo es reconocer que comparativamente con otra(s) puzolana(s) de menor contenido de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  ésta, la C, ha actuado "con ventaja" respecto al resto y en especial respecto a la D, N, A y M, y
- el impedimento de la formación de parte del total de ettringita de origen puzolana (y quizás también de origen  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento portland que la acompañe), ya que pese a ser el pH de la fase líquida  $> 10,8$ , ésta no deberá tener cantidad de  $\text{Ca}^{2+}$  suficiente y necesaria para ello, véase los apartados correspondientes venideros, VIII.1.2.2.3 (L-A), VIII.2.2.2.7 (ASTM C 452) y VIII.3.3.2.1.2 y 3 (H-1), y la Deducción XI.22.

2º.- Que a las puzolanas A y O u O y A, ocurrales todo lo contrario a lo dicho anteriormente, es decir, que fijen iones  $\text{Ca}^{2+}$  en cantidades

notablemente inferiores en bastantes ocasiones al resto, imperando por lo general el orden entre ambos citado en primer lugar, de menor a mayor fijación de  $\text{Ca}^{2+}$ , cuando el cemento portland acompañante ha sido el PY-4 ó el PY-6, y en segundo lugar cuando el cemento portland acompañante ha sido el P-1, P-2 ó P-31.

No obstante y pese a lo cual la puzolana O al originar mayores valores de alcalinidad que la A, confirma su mayor semejanza -según este parámetro  $[\text{OH}^-]$ -, con la C que la A, y consiguientemente participará mas que ésta de las causas del comportamiento de la C en este ensayo, dadas anteriormente.

Y para mayor abundamiento véase como las diferentes clasificaciones que se obtienen -a la edad del ensayo de 7 días, cemento portland matriz y cemento de mezcla dados- de las puzolanas aquí ensayadas, en función de su valor de alcalinidad  $[\text{OH}^-]$ , respectivo, son casi todas prácticamente coincidentes con la que se obtiene en función de su contenido de  $[\text{Na}_2\text{O}(\%) + 0,658 \times \text{K}_2\text{O}(\%)]$ . De modo y manera que según todo ello es lógico que el extremo de mayor valor de alcalinidad sea ocupado por la C seguida de la O y la A, bien a continuación ó salteada con alguna otra. Véase la Tabla 93.

- De la Agrupación II:

- a) Caso de las puzolanas CV-10 y CV-19, entre sí Únicamente: En este caso se puede decir que ocurre otro tanto a lo expuesto en el caso anterior por lo que al tener la fase líquida correspondiente al cemento PUZ preparado con la puzolana CV-19 y el cemento P-31, mayor cantidad de  $\text{Ca}^{2+}$  que su homónima de la puzolana CV-10 cabe pensar la posible influencia en ello del mayor contenido no sólo absoluto,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sino también relativo,  $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 (\%)}{\text{Fe}_2\text{O}_3 (\%)}$ , de la CV-10 sobre la CV-19.

Consecuentemente y por otra parte la alcalinidad por la razón apuntada en la Agrupación (G) habrá de tener opuesto comportamiento, extrañando no obstante que ambos valores no sean igual o simultáneamente distintos a los de fijación de iones  $\text{Ca}^{2+}$  por lo que cabe pensar en la posible influencia en algún sentido de los componentes alcalinos, ya que en este caso ocurre otro tanto de lo que ocurría en la puzolana C en el anterior.

- b) Caso de las puzolanas CV-10 y CV-19 junto con el resto de las demás O, M, A, C y M en el cemento matriz acompañante P-31 y cemento de mezcla 70/30:

Se confirma todo lo dicho para la Agrupación C.

- De la Agrupación I:

En tan sólo los cementos de mezcla 80/20 PA de cemento portland matriz constituyente común PY-6, y puzolanas O, A, C y M, se cumple que la  $[\text{Ca}^{2+}]$  de la fase líquida es mayor que la de los correspondientes al PY-4, mientras que con las de las puzolanas O y M ocurre lo contrario. Dicha generalidad deja de cumplirse apreciablemente en todos los casos con la adición de puzolana, dejando incluso de ser excepción aquellos casos que lo eran, y al contrario, los que no lo eran.

Ello lógicamente ha de ser debido al mayor contenido de C S del cemento PY-6 y sus mezclas, sobre el PY-4 y las suyas, respectivamente, con la posibilidad real de una mayor reserva

portlandística demostrable precisamente en estos medios y con estas mezclas con puzolana y de entre todas ellas más y mejor las que posean un mayor contenido de PY-6, o sea, las 80/20 como así ha ocurrido en el trabajo.

Por otra parte y en cuanto a la discrepancia citada, la misma ha de ser adscribible forzosa-mente a la composición y constitución físico-química de las puzolanas D y M, o mejor a su  $\text{SiO}_2^{\text{f-}}$  constitutiva, dado que en caso contrario, ó puzolana aluminica, caso de la M, ó sílico-aluminosa, caso de la D, A y C que deben poseer mayor cantidad de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{f-}}$  y menos de  $\text{SiO}_2^{\text{f-}}$ , ello no se cumple y si en cambio la generalidad citada al principio, es decir, todo lo contrario.

Discusión sobre el contenido de alcalinos  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , en la fase líquida del ensayo de Fratini.

Tabla 13.

Y entrando con algo mas de detalle en la propia CAPACIDAD DE CAMBIO provocada por la puzolana C y ocurrida en cada familia de cementos de mezcla ensayada, se observa lo siguiente (esta parte de la Discusión se comenzará por las familias de cementos de mezcla del cemento portland PY-4 y PY-6, por ser de bajo contenido en alcalinos,  $[\text{Na}_2\text{O}(\%) + (0,658 \times \text{K}_2\text{O}(\%))]$ , precisamente; con lo cual en ambos casos los contenidos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  de sus fases líquidas respectivas deberán de ser casi totalmente de origen puzolana C. Seguidamente se continuará la Discusión por las familias de cementos de mezcla del cemento portland P-1, P-2 y P-31, respectivamente, por la razón opuesta a la anterior).

13.- Familias de Cementos de mezcla PY-4/C y PY-6/C:

En ambas familias se observa que por lo general

1.- A igualdad de edad del ensayo de 7 días, los contenidos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  de su fase líquida respectiva aumentan con la presencia de puzolana C, siendo por lo general en ambos casos muy ligeramente mayores los de  $\text{K}^+$ , menos en el PY-4/C 70/30 que ocurre lo contrario, aunque tanto en un caso como en el otro podrían quizás considerarse prácticamente iguales, y

2.- A igualdad de edad del ensayo de 28 días

a) los contenidos de  $\text{Na}^+$ ,

. aumentan sinuosa y apreciablemente en el caso de la familia PY-4/C, y

. disminuyen ligeramente, en el caso de la familia PY-6/C, mientras que

b) los contenidos de  $\text{K}^+$ , disminuyen clara y notablemente, aunque mas clara y notablemente en el caso de la familia PY-4/C que en la familia PY-6/C, con la presencia de puzolana C.

28.- Familias de Cementos de mezcla P-1/C, P-2/C y P-31/C:

En ambas familias se observa que por lo general

a) a igualdad de edad del ensayo de 7 días,

. los contenidos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  aumentan del cemento de mezcla 80/20 al 70/30 para disminuir seguidamente en el 60/40, todos ellos hermanos, siendo no obstante el aumento, de mayor valor absoluto que la disminución en el caso de las familias P-1/C y P-31/C, ocurriendo lo contrario en la familia P-2/C, y



b) a igualdad de edad del ensayo de 28 días,

- los contenidos de  $\text{Na}^+$  disminuyen en el caso de las familias P-1/C y P-2/C, ocurriendo lo contrario en la familia P-31/C, mientras que a
- los contenidos de  $\text{K}^+$  les ocurre otro tanto a lo dicho antes para igual edad en el caso de las familias PY-4/C y PY-6/C, solo que lo ocurrido allí a la PY-4/C le ha ocurrido aquí a la P-2/C, presumiblemente por idéntico motivo, y

c) a igualdad de edad y cemento de mezcla, los contenidos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  son menores en el caso de la familia P-2/C que en las otras dos, las P-1/C y la P-31/C.

#### Interpretación

Y las razones de todo ello serían las siguientes: Como es sabido las posibilidades de intercambio catiónico son función directa principalmente

- del radio atómico del catión y consiguientemente de su energía de hidratación o mejor solvatación,
- de la carga del catión y consiguientemente de su energía de hidratación o mejor solvatación, y
- de la concentración de la disolución catiónica intercambiable (en este caso el  $\text{Ca}^{2+}$  de origen portlandita liberada de la hidratación de los componentes mineralógicos del clínker del cemento portland), las cuales hacen que según la serie liotropa el  $\text{Ca}^{2+}$  desplace al  $\text{K}^+$  y éste al  $\text{Na}^+$  de la parte de fase sólida, "fracción puzolana C", del ensayo de Frattini.

Pues bien, según ello el  $\text{K}^+$  al final de todo el proceso intercambiador con el  $\text{Ca}^{2+}$ , -edad de 28 días- deberá ser el catión alcalino que menos se detecte en la fase líquida y tanto menos cuanto menor sea la presencia de  $\text{Ca}^{2+}$ , o lo que es lo mismo, cuanto menor sea la causa o causas que provocan su presencia, entre las cuales se encuentran,

- la actividad puzolánica de la propia puzolana C,
- la cantidad de cemento, P ó PY dentro de una misma familia, y/o
- el contenido de  $\text{C}_3\text{S}$ , Standard de Cal y  $\text{Cao}_{\text{comb}}$ , a igualdad de cemento de mezcla (y el del cemento PY-4, 58,19%, es bastante menor que el del PY-6, 79,43%, ocurriendo lo contrario, lógicamente con los contenidos de  $\text{C}_2\text{S}$ , 19,46% y 2,29%, respectivamente), de dicho cemento.

Por el contrario al  $\text{Na}^+$  le deberá ocurrir lo opuesto por idéntica causa anterior, de aquí que tenga que ocurrir todo lo dicho al final de la Discusión 1ª de este apartado específico.

Y en cuanto al hecho común ocurrido a los contenidos de  $\text{K}^+$  tanto

- entre las familias de cemento PY-4/C y PY-6/C, discusión 1ª.2.b), de este apartado específico, como
- entre las familias P-1/C y P-31/C respecto de la P-2, discusión 2ª.a) y c), del mismo apartado es una confirmación más de que la causa reside en ambas tres anteriores, siendo la mas evidente de todas la que se refiere al contenido bajo de  $\text{C}_3\text{S}$  -ó elevado de  $\text{C}_2\text{S}$ - de ambos cementos portland matrices, PY-4 y P-2, respecto de los demás correspondientes PY-6, P-1 y P-31, respectivamente, con ellos comparados, además de la menor superficie específica del P-2 respecto del P-1 y P-31, lo cual va en favor de la razón aducida.

Por último y si a todo ello se le añade la causa adicional de que según la técnica analítica de DRX, uno de los componentes principales de la puzolana C es una Zeolita,  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}, (0)$ , además de la Phillipsita,  $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{Al},\text{Si})_{16}\text{O}_{32}-13,5\text{H}_2\text{O}, (0)$ , Fig. 6, queda de este modo justificada sobradamente la posibilidad de existencia de esa CAPACIDAD DE CAMBIO en las Puzolanas, y especialmente en este caso en la C, como se ha venido demostrando.

Por lo tanto y según todo ello, todos los cementos de mezcla ensayados en este trabajo, incluidos los PUZ industriales, aenos el PUZ-5, quedan sobradamente justificados de su comportamiento en el ensayo de Frattini. Y en cuanto a ese PUZ-5 pudiera darse el caso de que el mismo pueda estar constituido por una puzolana aluminica similar en gran medida a la M empleada en este trabajo, la cual justificaria su comportamiento.

ENSAYO DE FRATINI		
Clasificación de las Pautas de 0, N, O, A, C, M en función del contenido de:		
Código	Código (N°)	Código (mm/1)
de las tres líquidos (de menor a mayor valor):		
0000	C < A < N < D < M < O	N < M < C < D < O
0010	M < C < N < A < O < D	N < M < D < A < C < O
0020	M < N < C < O < A < D	N < M < D < A < O < C
0100	C < M < N < D < A < O	N < M < D < A < C < O
0110	C < M < N < D < A < O	N < M < D < A < O < C
0200	C < M < N < D < A < O	N < A < D < M < O < C
0210	C < N < D < M < O < A	N < D < A < M < O < C
0220	C < M < D < N < A < O	N < M < D < A < O < C
0300	C < M < D < N < A < O	N < M < A < D < O < C
0310	C < M < A < O < N < D	N < M < O < D < C < A
0320	C < M < O < A < N < D	N < M < A < D < O < C
0400	C < M < O < A < N < D	N < M < O < A < D < C
0410	C < N < M < D < O < A	N < M < D < A < O < C
0420	C < M < N < O < D < A	N < M < D < A < O < C
0500	C < M < N < O < D < A	N < M < D < A < O < C

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

70

75

80

85

90

95

100

0

5

10

15

20

25

30

35

40

### Conclusiones VI.1.2.1.2 (c)

Como consecuencia de todo lo anterior se deducen las siguientes conclusiones:

- 1ª.- Para todo cemento y sus mezclas con cada una de las puzolanas (que en adelante se le llamará cemento de mezcla) estudiadas, tanto el contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  como el de la alcalinidad,  $\text{OH}^-$ , en la fase líquida son función:
- a) de las características físico-químicas de la puzolana utilizada, (superficie específica, contenido de fase vítrea y/o cristalina, contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (%),  $\text{SiO}_2$  (%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (%), .... etc., pero sin olvidar además los contenidos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , respectivamente),
  - b) de la cantidad de la misma añadida, y
  - c) del cemento portland matriz utilizado, pues obviamente su velocidad de hidratación y liberación de portlandita, habrán de ser a su vez función, entre otros, tanto de su composición mineralógica como de su finura de molido.
- 2ª.- En general, a igualdad de edad del ensayo y cemento de mezcla 60/40, sea cual fuese el cemento matriz acompañante correspondiente (P-1 ó P-2 ó P-3 ó PY-4 ó PY-6), las puzolanas con las que menor cantidad de  $\text{Ca}^{2+}$  se encuentra en la fase líquida, han sido las C y M ó N y C, abundando más los casos correspondientes al orden citado en primer lugar, tres, que en segundo lugar, dos, y seguidas a continuación a una relativa distancia por la M, y a una mayor distancia por el resto, O, A y O, de tal modo que a estas dos últimas puede decirse con fundamento que les ocurre todo lo contrario que a las dos iniciales citadas.
- 3ª.- Véase la Deducción X. 22ª.

- 4.- Se puede considerar que, en general, existe una relación directa entre los contenidos, tanto absoluto,  $\text{Al}_2\text{O}_3(\%)$ , como relativo,  $\text{M.F.} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3(\%)}{\text{Fe}_2\text{O}_3(\%)}$  de la puzolana correspondiente y la fijación de iones  $\text{Ca}^{2+}$  por la misma, o mayor actividad puzolánica, habiendo de ser otros los parámetros distintos en particular RS, RMC y RMF, entre otros, los que confirmen el grado de bondad de la misma para cada caso concreto.
- 5.- Según las dos últimas conclusiones de las ocho puzolanas estudiadas, se pueden hacer por lo general y a igualdad de cemento de mezcla dos grupos en función de su actividad puzolánica, entendiéndose por tal la mayor fijación de iones  $\text{Ca}^{2+}$  -correspondida al parecer por la mayor cantidad absoluta,  $\text{Al}_2\text{O}_3(\%)$ , y/o relativa  $\text{M.F.} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3(\%)}{\text{Fe}_2\text{O}_3(\%)}$  de la misma-, que son los siguientes:
- a) en cuanto a la fijación de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y la correspondiente evolución de la alcalinidad:
    - grupo formado por la CV-10, CV-19, N, H y C, al que corresponden, por lo general, una mayor fijación de tal catión,
    - grupo formado por la D, O y A ó D, A y O, al que corresponde todo lo contrario, y
  - b) en cuanto a la evolución de la alcalinidad,  $\text{OH}^-$ , :
    - grupo formado por la D, H y N,
    - grupo formado por el resto encabezado normalmente por la C que es la que más componentes alcalinos posee.
- 6.- Las cantidades de fase líquida necesarias para realizar las determinaciones volumétricas del ensayo de Fratini correspondientes a las puzolanas D y H principalmente resultaron ser notablemente menores que las del resto de puzolanas ensayadas y comparadas con ellas y/o cualquier cemento puzolánico tradicional. De aquí que los resultados obtenidos de las mismas correspondan a cantidades alícuotas de fase líquida menores que las normalizadas (1).
- 7.- El mayor contenido de  $\text{C}_3\text{S}$  de un cemento portland, podrá hacer que la reserva alcalina, ó mejor reserva portlandítica, tanto del mismo como de sus cementos de mezcla PA, con mayor razón los PUZ, y disminuyendo lógicamente en éstos con su ausencia, sea superior desde el momento inicial de su hidratación, lo cual podrá permitir que los valores del pH del medio sean desde el origen muy elevados,  $\text{pH} > 11$ , y facilitando de este modo una mas pronta y rauda verificación de todas aquellas reacciones hidráulicas ulteriores que lo necesitan forzosamente para que se produzcan, como puede ser las de formación de sulfato - aluminatos de calcio hidratados,  $\text{SACH}$ , y más concretamente de ettringita, siempre y cuando,

claro está, el (los) contenido(s) de  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$  de la fase líquida correspondiente sea(n) el (los) adecuado(s) para dicho fin, según la conclusión 3ª anterior.

- 8ª.- La puzolana C ha tenido en todos los casos una "capacidad de cambio" con su fase líquida, causa y origen
- de su "aparente" mayor fijación de  $\text{Ca}^{2+}$  de la misma, y por tanto de su "aparente" mejor comportamiento que el resto en el ensayo de Fratini, y
  - de la mayor alcalinidad de su fase líquida correspondiente.

De todo lo cual se deduce que han de ser otros los parámetros distintos del ensayo de Fratini, en particular RS, RMC y RMF, los que confirmen el grado de bondad de las mismas para cada caso concreto, justificándose de este modo la necesidad de su razonada determinación y por tanto de la realización y puesta en práctica de la Parte Operatoria Previa (POP) y Fundamental (POF) de este trabajo, que se verán seguidamente por este orden, para fundamentarlas.

2ª.- Características de las PUZOLANAS :

(a).- Composición Química:

Los resultados obtenidos del análisis químico de cada una de las puzolanas, seleccionadas para la realización de este trabajo, se encuentran agrupados ordenadamente en la Tabla 11. De los mismos se han de hacer las aclaraciones siguientes, además de las ya realizadas en los márgenes inferiores de aquella:

1.- Antes de proceder a su análisis químico, las mencionadas puzolanas se molieron hasta que dejasen un residuo del 20%  $\pm$  1%, en peso, sobre el tamiz de 45  $\mu$  mm de luz de malla (153), y a continuación se han realizado las determinaciones que figuran en la Tabla 11 por medio de los procedimientos operatorios descritos en la norma ASTM C 311-77 (154) (155). Los resultados obtenidos, referidos a muestra seca a 95°C, y expresados como óxidos, excepto la Pérdida por Calcinación, P.F., y el Residuo Insoluble, R.I. se dan en tanto por ciento (%). en masa.

2.- Los contenidos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  se han determinado por fotometría de llama.

(b).- Determinación del Peso Específico Real :

El peso específico real de las puzolanas se ha determinado según la norma ASTM C 311-77 (154) (155).

(c).- Cálculo de Módulos:

A partir de los valores de la composición química de las puzolanas se han calculado aquellos Módulos o Índices, no normalizados, afines con los del cemento que se incluyen en la Tabla 11.

(d).- Estudio por DRX:

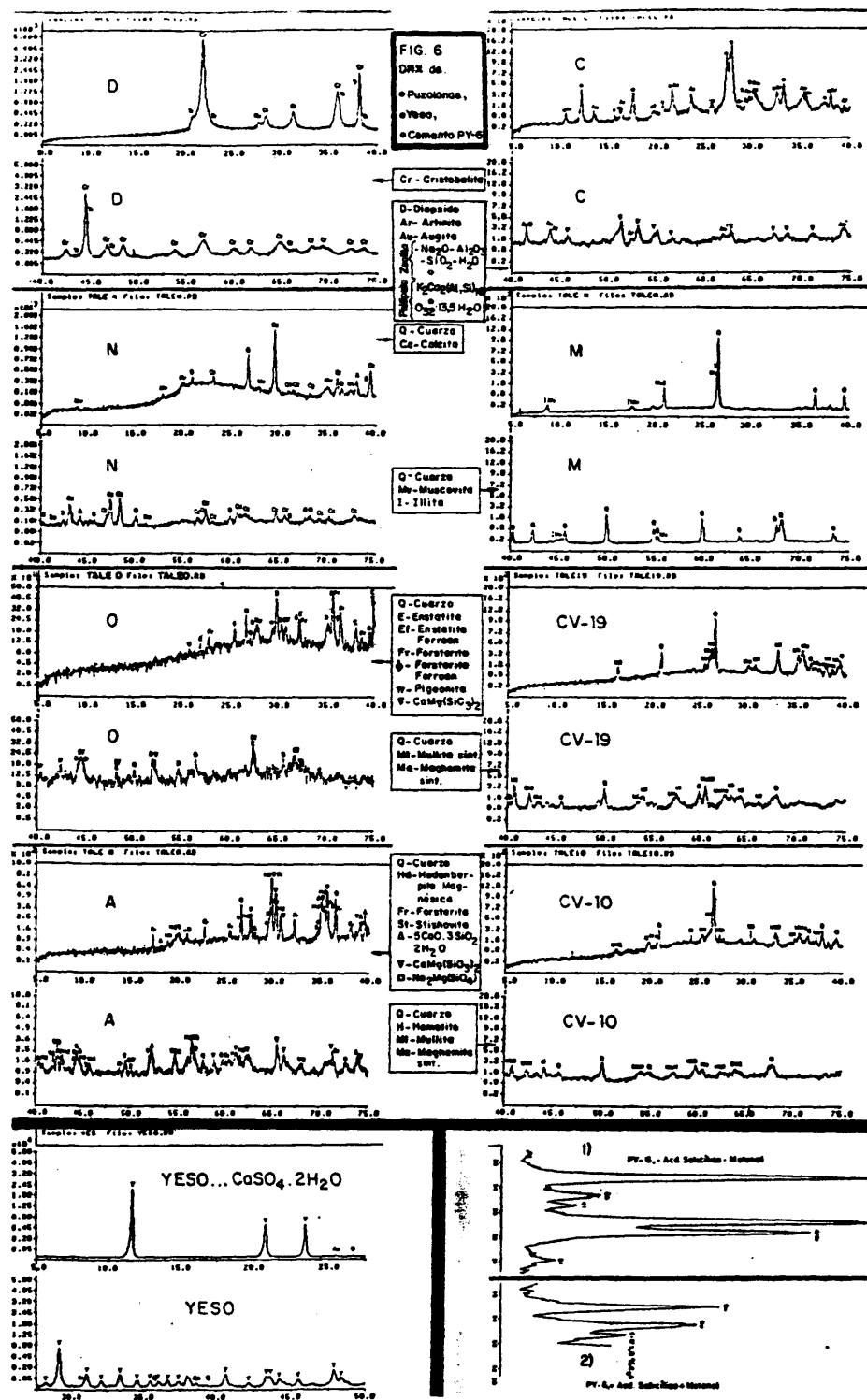
De cada una de las puzolanas seleccionadas para este trabajo, se ha hecho el estudio por DRX, utilizando el equipo y las condiciones de trabajo que se relacionan a continuación:

x Equipo de Trabajo: Se ha empleado un equipo automático de DRX marca Philips, compuesto de las siguientes unidades:

- Generador de alta tensión de 4 KW, PW-1730
- Rendiija automática de divergencia, PW-1386/50
- Monocromador de grafito, PW-1743/60
- Portamuestras automático para 42 muestras, PW-1780
- Unidad de refrigeración automática, DM-6000
- Software analítico Philips APD-1700 (V.S.2.0)
- Portamuestras con rotatorio
- Miniordenador DIGITAL, modelo PDP 11/24 de 256 Kbytes
- Teleimpresora DIGITAL, modelo LA-120
- Terminal gráfico Hewlett-Packard, modelo 2648-A
- Impresora gráfica Hewlett-Packard, modelo 2631-G
- Prensa semiautomática Herzog, modelo HDIFP
- Portamuestras modificados por el I.E.T.c.c. (diámetro = 20 mm)

x Condiciones de Trabajo:

- Anodo de Cu, siendo la longitud de onda  $K_1$  del Cu = 1,54,056, la  $K_2$  del Cu = 1,54435 y  $\frac{K_1}{K_2} = 0,50$
- Condiciones del Generador: 40 KV, 50 mA
- Tamaño del paso : 0,020°
- Tiempo de un paso ó "con-taje" : 0,80 s.
- Rango de Recorrido : de 5° a 75°
- Discriminación : desde nivel 35 a nivel 70
- Velocidad de la carta : 20
- Factor de escala :  $2 \cdot 10^3$
- Velocidad del Goniómetro : 0,025 grados/minuto



\* Resultados Obtenidos: Los diagramas de DRX obtenidos de cada una de las puzolanas se encuentran en la Fig. 6, habiéndose identificado los picos de los compuestos cristalinos constitutivos de cada una de ellas que se señalan en los diagramas correspondientes.

(e).- Estudio por espectrometría IR:

Se ha empleado un espectrofotómetro Beckman modelo 4250 de doble haz con el intervalo de frecuencias comprendido entre 200 y  $4.000\text{ cm}^{-1}$ . Los registros son lineales en números de onda, y en ordenadas se representa el tanto por ciento de transmisión.

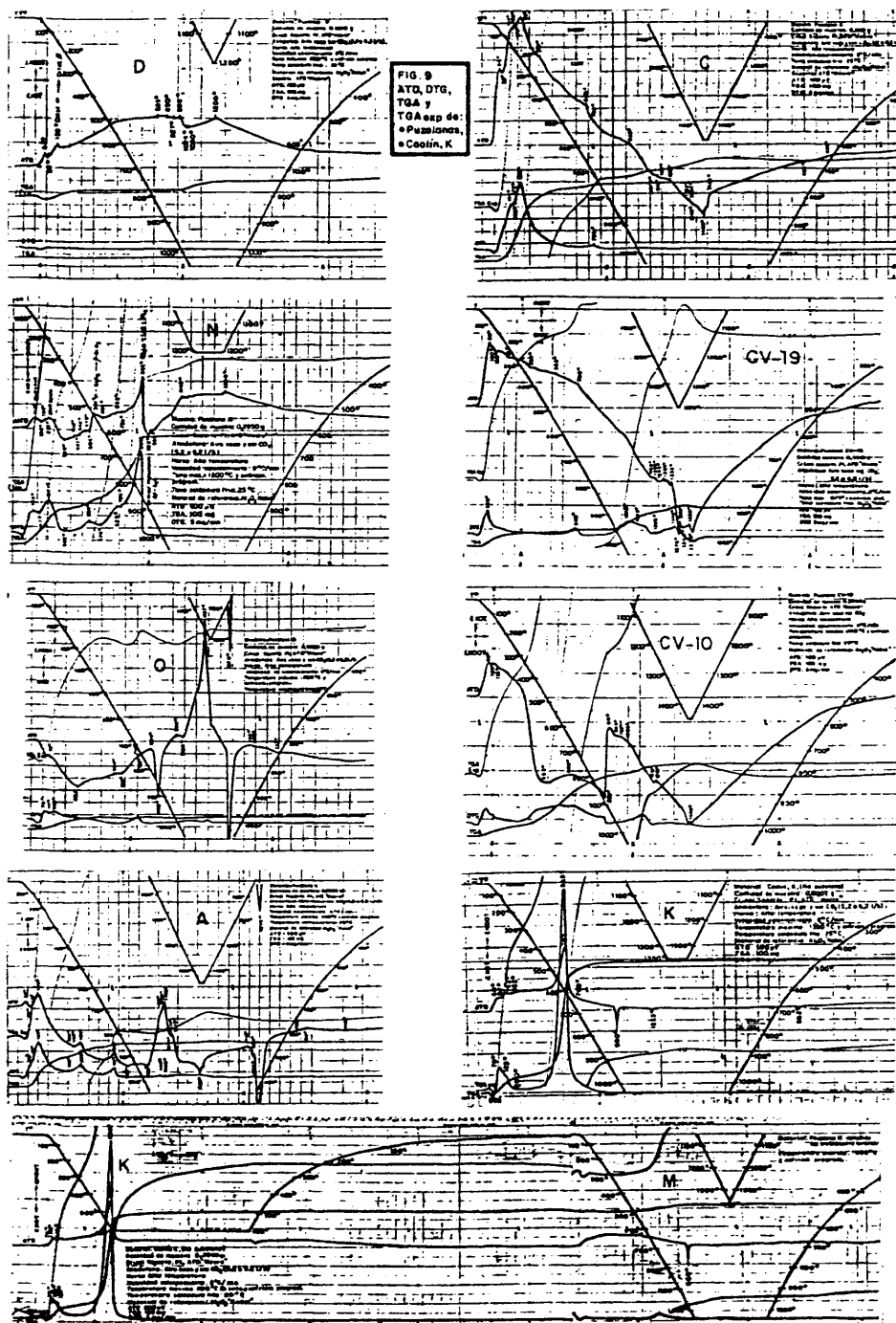
El sistema de preparación de muestras escogido es el de "comprimidos de KBr", y la razón para ello ha sido principalmente que es la técnica más extendida por sus conocidas ventajas: facilidad en las determinaciones cuantitativas, reproducibilidad, conservación de las muestras por tiempo ilimitado, sencillez en la técnica, etc.

La proporción en que se mezcla el KBr con la muestra oscila entre 0,7 y 3 mg. de muestra por 300 mg de KBr. Se emplea siempre una pastilla de KBr en "blanco", en el haz de referencia.

Los diagramas de IR correspondientes a cada una de las puzolanas seleccionadas, se encuentran en las Figs. nº 7 y 8 en donde se puede observar las diferencias que existe entre los grupos funcionales ( $\text{SiO}_4$ ,  $\text{AlO}_4$ ,  $\text{FeO}_4$ ,  $\text{AlO}_6$ ,  $\text{FeO}_6$ , H-O-H, OH,  $\text{CO}_3^{=}$  principalmente) de cada una de ellas. Para la confirmación ó identificación de cada uno de ellos, se utilizó la bibliografía correspondiente (285) (286) y (287).

(f).- Estudio por ATD, DTG, TGA y TGA<sub>exp.</sub>:

\* Equipo de Trabajo: Se ha empleado un Termoanalizador Mettler tipo A-1 nº 57. Este aparato puede registrar, simultáneamente y sobre la misma muestra, la curva Termogravimétrica o de pérdida de peso (T.G.), Derivatométrica o de velocidad de pérdida de peso (D.T.G.) y de Análisis Térmico Diferencial (A.T.D.). Tiene la posibilidad de trabajar con diversas atmósferas en la cámara de reacción, incluido el alto vacío y la atmósfera de vapor de agua, aunque en este trabajo se empleó la atmósfera de aire seco y sin  $\text{CO}_2$ .





x Condiciones de trabajo: Figuran en el termograma correspondiente a cada una de las puzolanas así estudiadas, véase Fig. 9.

x Resultados obtenidos: Los Termogramas correspondientes a cada una de las puzolanas seleccionadas, se encuentran en la Fig. 9. Para la confirmación o identificación de los mismos se utilizó la bibliografía correspondiente (263) (288).

(g).- Comentarios de los Resultados obtenidos de las Puzolanas:

1ª.- La composición química de las puzolanas seleccionadas para la realización de este trabajo, resultó ser concordante, como estaba previsto, por los objetivos y fundamentos del mismo, véase capítulos V y VI.

2ª.- De acuerdo con los diagramas de DRX, IR y ATD, las puzolanas silícicas D y N, son un ópalo de composición química  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , cuyo contenido en  $\text{H}_2\text{O}$  es variable pero generalmente menor del 10%. De aquí que dicha sílice hidratada, de ambas puzolanas, se ponga de manifiesto en su diagrama correspondiente de IR, Figs. 6 y 7.

3ª.- Del mismo modo, aunque distinta cuantía, las puzolanas O, A, C, CV-10 y CV-19, muestran igualmente en su constitución físico-química, la presencia de vidrio, -en el cual se deberá de encontrar casi toda o la mayor parte de la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{F-}}$  de cada puzolana aunque no obstante y en el caso de las puzolanas, C, CV-10 y CV-19, parte del total de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  respectivo obtenido por vía química se ha de encontrar además en forma cristalina la cual es la mullita en el caso de las dos últimas, véase Fig. 6-, aunque el diagrama de IR, Figs. 6 y 7 y ATD, Fig. 8, confirman que es de muy distinto origen y etiología que el de las puzolanas silícicas anteriores D y N (la banda entre 970 y 950  $\text{cm}^{-1}$  que es de grupos SiOH que se condensan en forma de uniones Si-O-Si, es distintivo de las diatomeas y otras sílices opalinas; de aquí que no aparezca tan nítidamente nada mas que en la D y N, y no en el resto).

4ª.- La puzolana artificial M o metacaolín, obtenida a partir de un caolín con cuarzo calentado a 750 °C durante 2 horas y enfriado bruscamente a 0 °C, contenía una riqueza en metacaolín del 50,41% y el resto cuarzo, lo cual permitió el poder adscribirle al mismo el calificativo de "cuarzoso".

5ª.- La técnica del ATD demuestra que, a diferencia de otros materiales, el secado del caolín cuarzoso empleado a 105 °C puede afectar al agua libre y adsorbida.

6ª.- La humedad, 0,16 %, de la puzolana M, es la fijada del vapor

de agua de la atmósfera, durante la manipulación que sufre la muestra durante su enfriamiento y posterior análisis cuantitativo.

7º.- De acuerdo con Mackenzie (261) el caolín cuarzoso empleado en este trabajo, es del tipo pM, por no presentar un pequeño pico endotérmico inmediatamente antes (zona de 900° - 950°C) del exotérmico ocurrido a 978°C con formación de mullita.

8º.- El contenido de Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> (expresados como óxidos) de la puzolana C resultó ser apreciablemente elevado respecto al del resto de las puzolanas. Otro tanto pero en menor medida se puede decir de la O y CV-10, por este orden.

### 3º.- Características del YESO:

(a) Composición Química: La composición química de la piedra de yeso natural utilizada como agresivo en este trabajo, se ha determinado mediante la técnica de trabajo descrita en la norma ASTM C 471-66 (264). Los resultados obtenidos figuran en la tabla 11. Asimismo los contenidos de Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>, se han determinado por fotometría de llama.

Por otra parte, a partir de los valores de la composición química del yeso, se determinó por cálculo según especifica la citada norma su composición potencial, ver tabla 11, presentando una riqueza en CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O del 95,58%, que se ha confirmado por DRX, véase Fig. 6.

### VI.1.2.2. Marcha Operatoria

Este apartado comprende todo el cúmulo de ensayos realizados en este trabajo, los cuales por su marcada diferencia de objetivos y volumen de los mismos, merecen tratamiento propio. De aquí que, todos ellos hayan quedado enmarcados en dos Capítulos, el VII y VIII, con entidad suficiente como para que tengan dicho tratamiento individualizado, no exento de relación alguna, lo cual hace que el segundo sea una consecuencia del primero y éste una necesidad de aquél, como se verá seguidamente.

VII.- PARTE OPERATORIA PREVIA

## VII.- PARTE OPERATORIA PREVIA

### VII.1.- Objetivos Puntuales

Los objetivos puntuales de esta Parte Operatorio Previa, POP, se pueden concretar en dos:

- 1º.- La Formación de Ettringita Sintética de distinto origen y etiología:  
"Fratinis Selenitosos", y
- 2º.- La Detección, ó no, de alguno(s) posible(s) Sulfato-Silicato(s) de Calcio Hidratado(s),  $\bar{S}$  S CH, con ó sin carácter disruptivo.

Para ello y como se pudo observar a lo largo de los múltiples apartados del Cap. IV, los materiales que en un medio básico y selenitoso adecuados, puede originar ettringita sintética, y que a su vez han de estar en íntima relación con el título y los fines de este trabajo, pueden ser, entre otros:

- a) Los Cementos Portland,
- b) Las Puzolanas,
- c) Los Cementos Puzolánicos

Por lo tanto,

- Para alcanzar el objetivo 1º mediante los materiales tipo a) citados, se han elegido tres cementos portland, de los doce inicialmente seleccionados, de contenido muy dispar de  $C_3A$ , como han sido el P-1 (14,11% C A), el P-31 (7,62%  $C_3A$ ) y el PY-6 ( $\approx 1,00\%$   $C_3A$ ),
- Para alcanzar el objetivo 1º mediante los materiales tipo b) citados, se han elegido cinco puzolanas, de las ocho inicialmente seleccionadas, de contenido muy dispar de  $Al_2O_3$ , como son, la D, O, A, C y M, por este orden de menor a mayor contenido de la misma, habiéndose descartado,
  - la puzolana N, porque la escasa ettringita que pudiera formar, en su caso, dada su baja cantidad de  $Al_2O_3$  constituyente, podría originar confusión en la detección de sulfato-silicatos de calcio hidratados cristalinos,  $\bar{S}$ SCH, en caso de que se formasen, y
  - las puzolanas CV-10 y CV-19, por lo dicho sobre los sulfato-ferritos de calcio hidratados,  $\bar{S}$ FCH, y sus posibles, ó no, consecuencias a muy largo plazo, citadas en el Cap. III y en el Fundamento Teórico 1º b),
- Para alcanzar el objetivo 1º mediante los materiales tipo c), se utilizaron los cementos de mezcla PUZ, 70/30, en peso, preparados con el cemento portland matriz PY-6 y cada una de las puzolanas elegidas anteriores, es decir, D, O, A, C y M, respectivamente. Y el motivo por el que se eligió dicho cemento matriz PY-6 y no el P-1 y/o el P-31, fué doble,

- para tratar de confirmar, ó no, que las cinco puzolanas elegidas anteriores D, O, A, C y M, podrían tener similares comportamientos, en la formación correspondientes de ettringita, a los que se obtuvieren cuando se ensayaran solas, sin la compañía de un cemento portland; para lo cual su cemento matriz acompañante debería formar muy escasa o nula cantidad de ettringita, de origen  $C_3A$ , como así ha sucedido como se verá, con el cemento PY-6 elegido para tal fin por tener  $\approx 1,00\%$  de  $C_3A$ , pues en caso contrario, caso de los cementos P-1 y P-31 con 14,11% y 7,62% de  $C_3A$  respectivamente, tal confirmación hubiese sido imposible ante la imposibilidad material de poder diferenciar semicuantitativamente por DRX, ambos tipos de ettringitas de orígenes distintos,
- para tratar de confirmar, según lo anterior, que especialmente tales cementos PUZ de cemento matriz de escaso o nulo contenido de  $C_3A$ , como es el PY-6 empleado, también pueden formar ettringita en muy distinta cuantía según la puzolana acompañante del mismo en cada caso concreto, la cual obviamente habrá de serle imputada en su mayoría a esta última que no aquél, por la razón apuntada de su muy escaso contenido,  $\approx 1,00\%$ , de  $C_3A$ , y finalmente,
- Para alcanzar el objetivo 2º mediante los materiales tipo b) y c), se han elegido
  - de los materiales tipo b), la puzolana D
  - de los materiales tipo c), el cemento de mezcla PUZ PY-6/D70/30.

El primero, para evitar en lo posible la escasa ó muy escasa ettringita que se pudiera formar del escasísimo  $C_3A$  y/o  $C_4AF$  aportado por la fracción cemento matriz PY-6, la cual podría ser confundida por sulfato-silicatos de calcio hidratados cratinos,  $\bar{S}SCH$ , de aquí que no se empleare fracción cemento matriz PY-6 como aportadora del medio básico adecuado para tal fin y si en cambio  $Ca(OH)_2$  R.A., y el segundo para facilitar la acción puzolánica de dicha puzolana D mediante la portlandita liberada en la hidratación de la fracción cemento matriz PY-6, la cual y como es sabido es de una mayor actividad que el  $Ca(OH)_2$  R.A., al objeto de favorecer lo mas posible la formación, en su caso, de los  $\bar{S}SCH$  antes citados.

Por todo lo cual, con todos y cada uno de los materiales anteriores elegidos, se realizaron previamente las siguientes operaciones:

- 1º.- Se mezcló por separado, con yeso natural y agua desionizada, hervida y enfriada a 40 °C, cada uno

- de los tres cementos portland elegidos anteriores, es decir, el P-1, P-31 y PY-6, respectivamente, y
- de los cinco cementos de mezcla PUZ 70/30, en peso, preparados previamente al efecto, mediante el cemento portland PY-6 y cada una de las puzolanas elegidas anteriores, es decir, la D, O, A, C y M, respectivamente.

2<sup>a</sup>. - Se mezcló por separado con hidróxido de calcio,  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A., yeso y agua desionizada, hervida y enfriada a 40 °C, cada una de las puzolanas anteriores, es decir, la D, O, A, C y M, respectivamente.

Por otra parte y antes de continuar adelante, se ha de aclarar que:

1<sup>a</sup>. - La adición de yeso natural a que se hace referencia en los dos puntos anteriores, se realizó de modo y manera que tuvieran un 7,0% ó un 21,0%, en peso, de  $\text{SO}_3$ , respectivamente, en cada caso de mezcla selenitosa citada.

2<sup>a</sup>. - Cada mezcla, cemento y/o puzolanas - yeso natural, se homogeneizó -previamente a la adición del agua desionizada de hidratación, a la misma-, mediante un aparato "Túrbula" provisto de bolas de caucho virgen, durante 30 minutos, tiempo mas que suficiente para garantizar con estos materiales, la obtención de un producto lo suficientemente homogéneo para los fines perseguidos.

A continuación, todas y cada una de las mezclas - conglomerantes más (21,0% de  $\text{SO}_3$ ) ó menos (7,0% de  $\text{SO}_3$ ) yesíferas, fueron tratadas según prescribe la parte operatoria previa del ensayo de Fratini (1), para lo cual,

- de fase sólida (cemento P ó PY solo ó al estado puro, ó PUZ 70/30, ó Puzolana sola con  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A., mezclados con yeso natural en distinta cuantía), se emplearon  $20 \pm 0,01$  g., y
- de fase líquida, se emplearon 100 ml. de agua desionizada, hervida y enfriada a 40 °C.

Y todo ello, colocado y agitado manual y enérgicamente, durante 1 minuto, en un matraz, erlenmeyer de vidrio JENA resistente a los álcalis, de 300 ml. de capacidad, herméticamente cerrado y dejado en reposo en un termostado regulado a 40 °C.

VII.2.- Cálculo y Dosificación de Materiales para la Formación de Ettringita Sintética de Distinto Origen y Etiología: "Fratinis Selenitosos"

VII.2.1.- A partir de los Cementos Portland solos y/o mezclados con Puzolanas, Únicamente.

Para los cementos portland resistentes, ó no, al yeso, en este caso el P-1, P-31 y Py-6, así como para los PUZ, correspondientes, 70/30, (70 es 70%, en peso, de cemento PY-6 y 30 es 30%, en peso, de puzolana correspondiente), preparados con el cemento PY-6 y cada una de las puzolanas en cuestión D, O, A, C y M, se aplicaron las fórmulas de un simple problema de mezclas de cemento PY ó PUZ y yeso para el caso de poseer, como se dijo, un 7,0% de  $SO_3$  ó un 21,0% de  $SO_3$  respectivamente, las cuales se encuentran en el apartado 6.2 del método acelerado de ensayo ASTM C 452 (239). Como resultado de las mismas se obtuvieron las cantidades correspondientes de cada cemento portland sólo o de mezcla que figuran en la Tabla 14.

Tabla 14

Materiales	CEMENTOS														Total			
	PORTLAND							PUZOLANICOS 70/30										
	P-1	P-31	Py-6	P-1	P-31	Py-6	P-1	P-31	Py-6	P-1	P-31	Py-6	P-1	P-31		Py-6		
	7,0% de la mezcla - conglomerante cemento mas yeso																	
	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50
arete g:	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50
Peso g:	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50	17,50
Yeso g:	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
CEM. P. A. g	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91	18,91

Tabla 16

Cemento	x g. de ettringita formados 1 g. de $C_3A$	
	en cada mezcla-conglomerante yesífera del:	
	7,0% de $SO_3$	21,0% de $SO_3$
P-1	$\frac{6,46}{2,59} = 2,49$	$\frac{7,60}{1,66} = 4,58$
P-31	$\frac{6,45}{1,41} = 4,5745$	$\frac{4,12}{0,90} = 4,5777$
Py-6	$\frac{0,82}{0,18} = 4,55$	$\frac{0,50}{0,11} = 4,54$

#### VII.2.2. A partir de Puzolanas.

En esta parte del trabajo la capacidad de reacción de la puzolana con el hidróxido de calcio,  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A., se ha efectuado con las mezclas puzolana +  $\text{Ca(OH)}_2$ , R.A., de tal modo que se ha sustituido a la portlandita originada en la hidratación del cemento portland PY-6 por dicho reactivo.

Por otra parte y puesto que la duración de este ensayo iba a ser de dos años, se intentó que el medio básico característico de los sistemas "hidróxido de calcio-puzolana" - que tratan, en forma de normativas o códigos de buena práctica diversos, de determinar, generalmente en 28 días, el grado de "bondad" de aquellas por la cuantía de resistencias mecánicas proporcionadas a dicha edad - , alargara y mantuviera sus características iniciales de pH y saturación del medio en  $\text{Ca}^{2+}$  lo más posible, sin necesidad de control riguroso y sofisticado, para lo cual la cantidad de hidróxido de calcio se hizo notablemente superior a la de las normativas citadas, donde por lo general suele alcanzar el 25% en peso. De aquí que y según ello, se decidiera duplicar tal cantidad de hidróxidos de calcio al 50% en peso e incluso 61,04%, ya que de este modo no sólo no se contravenía la idea anterior sino que además se hacía coincidir en tal contenido con el del ensayo de Matousek y Säuman (194) (aunque éste para otros fines tecnológicos), en el que la parte de puzolana supuso el 14,07% en peso, y por otro lado la de  $\text{SO}_3$  del sistema el 6,045% en peso (equivalente al 13% en peso de yeso).

Estas últimas cantidades citadas, manteniendo constante el contenido de hidróxido de calcio, se convertirían proporcionalmente en el 61,04%, el 23,91% y el 15,05%, en realidad 15,0535%, en peso, de hidróxido de calcio, puzolana y yeso, respectivamente, en una nueva mezcla-conglomerante con el 7,0%, en peso, de  $\text{SO}_3$ . Las mismas traducidas a 20 g. de esta última, supondrían 12,21 g (12,2080 g) de hidróxido de calcio,  $\text{Ca(OH)}_2$  (clase Merck), 4,78 g (4,7813 g) de puzolana D, O, A, C ó M, y 3,01 g de yeso natural, respectivamente, siendo naturalmente este último el que hace que tal mezcla-conglomerante posea el 7,0% de  $\text{SO}_3$  que es de lo que se trataba en definitiva.

Asimismo y para conseguir mezclas-conglomerantes similares con el 21,0% de  $\text{SO}_3$ , se partió de la idea anterior sólo que en este caso el cociente  $\frac{\% \text{Ca(OH)}_2}{\% \text{puzolana}} = \frac{61,04\%}{23,91\%} = \frac{12,208}{4,7813}$ , se mantuvo constante, y la suma  $\% \text{Ca(OH)}_2 + \% \text{Puzolana}$ ,  $61,04\% + 23,91\%$ , se hizo igual a la



diferencia entre 100 y tres veces el porcentaje 15,05% del yeso en la del 7,0% de  $\text{SO}_3$  (ya que 21,0% de  $\text{SO}_3$  es tres veces el 7,0%), habiendo de ser por tanto el 45,16%, en peso, el yeso que habría de contener la nueva mezcla-conglomerante del 21,0% de  $\text{SO}_3$ , o sea,  $3 \times 15,0535 = 45,1605\% \approx 45,16\%$ , por lo que  $\% \text{Ca}(\text{OH})_2 + \% \text{Puzolana} = 100\% - 45,16\% = 54,84\%$ , en peso.

De donde se deduce que las cantidades respectivas de materiales, en este caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$ , para 20 g de mezcla-conglomerante, hidróxido de calcio más puzolana más yeso natural:

- de hidróxido de calcio, el 39,41% en peso, o sea, 7,88 g,
- de puzolana, el 15,43%, en peso, o sea, 3,09 g, y
- de yeso natural, el 45,16%, en peso, o sea, 9,03 g.

Mezcla-conglomerante, con 7% de  $\text{SO}_3$ , de cemento P-1, P-31 ó PY-6 + Yeso. Edad: 730 días.

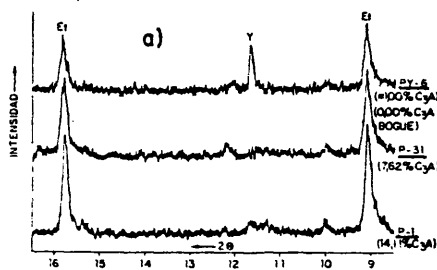
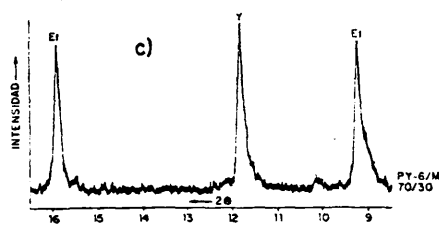
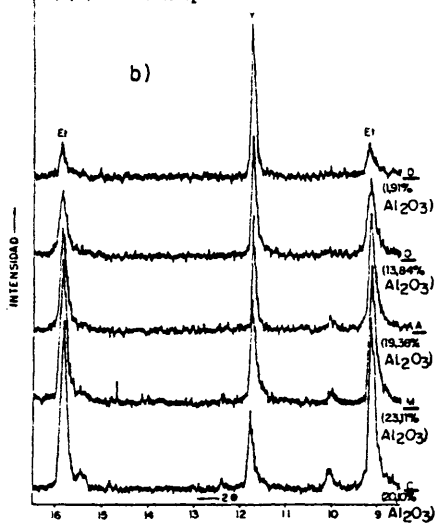


GRAFICO Nº 1

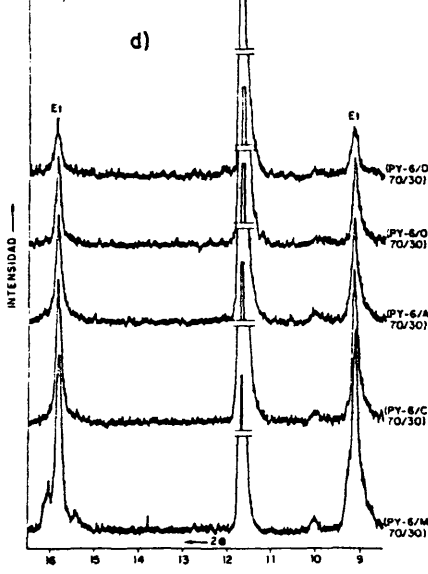
Mezcla-conglomerante, con 7% de  $\text{SO}_3$ , de cemento PY-6/M 70/30 + Yeso. Edad: 730 días.



Mezcla-conglomerante, con 7% de  $\text{SO}_3$ , de Puzolana D, O, A, C ó M +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  R.A. + Yeso. Edad: 730 días



Mezcla-conglomerante, con 21% de  $\text{SO}_3$ , de cemento (PY-6/D, O, A, C ó M 70/30) + Yeso. Edades: 4(0-a) y 3(A-0). Esta clasificación se obtuvo y durante un mayor nº de edades del ensayo.



WII.3.- Realización de los Ensayos de la Parte Operatoria Previa, PCP.

- 1º.- Toma de muestra y preparación de la misma para su análisis y estudio por DRX:

A continuación, a las edades de 1, 7, 14, 21, 28, 60, 90, 270 y 730 días se fueron tomando, con una cucharilla de acero inoxidable sendas muestras de la fase sólida de todas y cada una de las mezclas selenitosas anteriormente preparadas a modo de Fratinis y conservada a 40 °C en termostato.

Cada muestra de fase sólida tomada, tras eliminarle lo mas posible el líquido que la empapaba con papel de filtro, si estaba lo suficientemente blanda, se pasaba directamente a hacerle el diagrama de DRX correspondiente; por el contrario si no lo estaba, se disgregaba con simple presión con el pistilo de un mortero de ágata sobre el fondo del mismo, con un ligero exceso de líquido de conservación sobrenadante sobre la muestra y a continuación una vez disgregada la misma, operar como en el caso anterior.

Todas las operaciones manuales descritas se hicieron en corriente de nitrógeno al objeto de evitar la carbonatación de las muestras.

- 2º.- Equipo y Condiciones de trabajo empleados:

Tanto el Equipo como las Condiciones de trabajo empleados fueron las mismas ya descritas en el apartado VI.1.2.1.2.2º (d) excepto en que estas últimas, las DRX se han efectuado entre 8º y 15º para el análisis de formación de ettringita (de distintos orígenes y etiología), en función del tiempo de hidratación selenitosa de la mezcla yesífera respectiva.

Por otra parte y en las muestras correspondientes, se ha hecho el estudio por DRX entre 5º y 50º para el análisis cualitativo de la formación, en su caso, de sulfato-silicatos de calcio hidratados,  $\text{SSCH}$ .

- 3º.- Análisis y determinación semi-cuantitativamente de ettringita (de distintos orígenes y etiología), en función del tiempo de hidratación selenitosa de cada una de las mezclas citadas preparadas:

Este análisis de la formación de ettringita en función del tiempo de hidratación selenitosa en todos y cada uno de los

distintos medios hidráulicos yesíferos antes citados, se llevó a cabo eligiendo primeramente los picos mas característicos de la ettringita que generalmente no suelen presentarse solapados con los correspondientes a otros compuestos muy comunes en la hidratación selenitosa de materiales cementicios diversos, como son el  $2\theta = 9,080^\circ$  y el  $2\theta = 15,788^\circ$ , para y a continuación medir la intensidad del pico primero ( $2\theta = 9,080^\circ$ ), en cada caso, al ser ésta una representación aproximada de la cantidad de ettringita presente en la fase sólida correspondiente analizada. (El segundo pico,  $2\theta = 15,788^\circ$ , se midió también para ir confirmando en él los resultados obtenidos en el primero ó fundamental, para llevar a cabo este análisis semicuantitativo.

#### VII.4.- Resultados Experimentales Obtenidos.

Antes de todo, se ha de decir que la representación gráfica de los, resultados experimentales obtenidos, en particular el análisis y determinación semi-cuantitativa de ettringita de distinto origen y etiología, se llevó a cabo tomando cada una de las intensidades de pico medidas en cada caso, para a continuación representarlas en su papel-semilogarítmico respectivo, de modo y manera que,

- en abcisas figurase el "Tiempo de Hidratación Selenitosa", de cada mezcla-conglomerante, en días, y
- en ordenadas, la "Intensidad de pico, relativa, de la ettringita", de cada mezcla-conglomerante selenitosa citada, en número de divisiones verticales de la carta, correspondientes al  $2\theta = 9,080^\circ$ .

Todos los resultados obtenidos se encuentran en los gráficos nº 1 y 2, y Fig. 10, y la discusión y su interpretación respectiva, correspondiente a cada grupo afín de ellos, es la siguiente:

VII.4.1.- Discusión e Interpretación correspondiente.

VII.4.1.1.- De los Cementos Portland, P-1, P-31 y PY-6, sólo  
, con 7,0% y 21,0% de  $SO_3$ , respectivamente.

Estudio comparativo correspondiente :

1º.- Cementos P-1, P-31 y PY-6 con 7,0% de  $SO_3$ , Fig. 10 a)

Discusión VII.4.1.1.1º

1º.1º. Hasta la edad del ensayo de 28 días, con la excepción de la de 21 días, la intensidad de pico de la ettringita formada por los cementos P-1 y P-31, aún siendo bastante similar, es inversamente proporcional a las cantidades respectivas de  $C_3A$  de cada uno de ellos. No obstante, pasada dicha edad, la proporcionalidad se alcanza y se conserva, junto con la similitud anterior denunciada hasta la edad final de ensayo de 730 días. Por tanto y en definitiva, se puede decir con aproximación cierta, que la intensidad de pico de la ettringita correspondiente a ambos cementos P-1 y P-31 así ensayados y comparados, es bastante similar a lo largo de todo el ensayo, ocurriendo aproximadamente otro tanto con la correspondiente al cemento PY-6, aunque lógicamente en mucha menor cuantía por su muy escaso contenido en  $C_3A$ ,  $\approx 1,0\%$ , pese a que por cálculos de Boque resultare nulo.

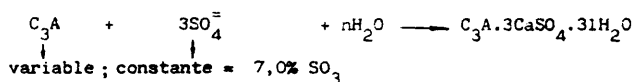
1º.2º. La curva representativa de la formación de ettringita a lo largo del ensayo, de cada uno de los cementos elegidos, P-1 P-31, así ensayados y comparados, se puede adscribir aproximadamente a una curva en forma de campana muy abierta, ver Fig.10 a), cuyo valor máximo respectivo, se alcanzó en los tres cementos citados a la edad de 21 días, y cuya línea base, al resultar ser suavemente ascendente durante el transcurso del ensayo, ha dado lugar a que la intensidad de pico de la ettringita respectiva al final del mismo, sea mayor, en los tres casos, a la correspondiente formada a la edad de un día. La curva del cemento PY-6, pese a tener también un máximo a la edad de 21 días el mismo se vé aventajado por el de la edad de 730 días. No obstante y en general la evolución de dicha curva no se asemeja tanto a una campana de Gauss y si ~~en cambio~~ se asemeja bastante más a la del (PY-6).

Interpretación VIIA.11.P.1\*

La discusión 1º.1º. se confirma por estequiometría, pues,

- con los contenidos respectivos de  $C_3A$  de tales cementos, P-1 (14,11%  $C_3A$ ) y P-31 (7,62%  $C_3A$ ), y
- con la cantidad constante de iones sulfato (determinada como  $BaSO_4$  y expresada como  $SO_3$ ), púestos como agresivo, del 7% de  $SO_3$ ,

la reacción de formación de la ettringita, en ambos casos,



viene regida por dicha cantidad constante de iones sulfato, expresados como 7,0% de  $SO_3$ , presente en la misma. De aquí que en el supuesto de que no se formase nada de sulfatoferritos de calcio hidratados, SFCH, la cantidad de  $C_3A$  que a lo sumo dicho 7,0% de  $SO_3$  deberá fijar de tales cementos portland citados, P-1 y P-31, para formar ettringita, debería ser del 7,93%, debiendo quedar por tanto  $C_3A$  libre, en el caso del cemento portland P-1, es decir,  $14,11\% - 7,93\% = 6,18\%$  de  $C_3A$ , y nada de  $C_3A$  libre en el caso del cemento portland P-31. Todo lo cual reportará paralelamente la disminución, hasta anularse, de dicho 7,0% de  $SO_3$  inicial púestos como agresivo, lo cual se confirma por las gráficas de DRX correspondientes, véase Gráfico nº 1 a).

Por el contrario, en el caso del cemento portland PY-6, obviamente, deberán sobrar iones sulfato del 7,0% de  $SO_3$  inicial, muy probablemente en forma de  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , y en cambio "consumirse" todo el escaso ( $\approx 1,0\%$ )  $C_3A$  que portase, para dar ettringita, como igualmente lo confirma su gráfica de DRX respectiva a la edad de 2 años, véase Gráfico nº 1 a), indicándonos dicha formación de ettringita, que,

- o bien, la misma procede de su muy escaso  $C_3A$ ,  $\approx 1,0\%$ , pese a que como se ha dicho por cálculos de Bogue resultare nulo,
- o bien, la misma, en particular el segundo máximo, procede no tanto del  $Al^{3+}$ , del  $C_3A$  sino del  $C_4AF$ , y/o sus diversas soluciones sólidas, que dicho cemento contiene, pues de todos es conocido la más lenta reaccionabilidad de este

último que de aquél, con los iones sulfato, para dar ettringita,

- o bien, la misma procede, en mayor o menor medida, de ambos casos posibles anteriores.

Por otra parte de la discusión 1ª.2ª se desprende, que pese a haberse formado la mayor parte de la ettringita que debiera en cada caso, en las primeras edades del ensayo, y más concretamente a la edad de 21 días, la misma no ha debido alcanzar, aún, su totalidad, lo cual se va consiguiendo algo más lentamente, al parecer, conforme transcurre aquél.

2ª.- Cementos Portland P-1, P-31 y PY-6 con 21,0% de  $SO_3$ , Fig. 10 d)

Discusión VII.4.1.1.1.2ª

2ª.1ª. En este caso la formación de ettringita se puede decir que, en general, es ascendente durante el transcurso del ensayo, con ciertas alternancias, a veces notables e intrascendentes a lo largo del mismo.

Interpretación VII.4.1.1.1.2ª

Muy probablemente ello se deba a que,

- o bien en este caso se alcanza más y mejor la estequiometría con alguno de los cementos portland ensayados, como así ocurre con el P-1, véase Tabla 16, donde 4,58 g.ett./1 g.de  $C_3A$  es mayor que 2,49 g.ett./1 g. de  $C_3A$ ,
- o bien en este caso se mantiene más y mejor la ettringita formada inicialmente por el cemento de que se trate por la razón que se dá de la discusión 2ª del punto siguiente,
- o bien por ambos anteriores en mayor o menor medida.

3ª.- Estudio comparativo de los cementos portland P-1, P-31 y PY-6 con 7,0% y 21,0% de  $SO_3$ , respectivamente, Fig. 10 a) y d):

3ª.1ª. A la vista de todo lo anterior y de las Fig. 10 a) y d), pudiera llegar a parecer paradójico lo que en realidad no lo es. Y es que pese a haber mayor contenido absoluto de  $C_3A$  en cada mezcla-conglomerante yesífera con el 7,0% de  $SO_3$ , del cemento P-1 y del cemento P-31, respectivamente, que en sus correspondientes homónimas del 21,0% de  $SO_3$  (2,59g. de  $C_3A$  > 1,66g. de  $C_3A$ , caso

Tabla 15

Cálculos teóricos estequiométricos de fijación de SO <sub>3</sub> para formar ettringita		Dosificación de la mezcla conglomerante yesífera con:			
		7.0% SO <sub>3</sub>	21.0% SO <sub>3</sub>		
Cemento P-1		18,35 (que aporta ≈ 2,59 g C <sub>3</sub> A)	11,74 (que aporta ≈ 1,66% g C <sub>3</sub> A)		
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O		1,65 (que aporta ≈ 0,77 g SO <sub>3</sub> )	8,26 (que aporta ≈ 3,84 g SO <sub>3</sub> )		
Cemento P-31		18,51 (que aporta ≈ 1,41 g C <sub>3</sub> A)	11,84 (que aporta ≈ 0,90 g C <sub>3</sub> A)		
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O		1,49 (que aporta ≈ 0,69 g SO <sub>3</sub> )	8,16 (que aporta ≈ 3,79 g SO <sub>3</sub> )		
Cemento PY-6		17,86 (que aporta ≈ 0,18 g C <sub>3</sub> A)	11,43 (que aporta ≈ 0,11 g C <sub>3</sub> A)		
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O		2,14 (que aporta ≈ 1,00 g SO <sub>3</sub> )	8,57 (que aporta ≈ 3,99 g SO <sub>3</sub> )		
Cantidad teórica (g) de SO <sub>3</sub> que fijarán los gramos de C <sub>3</sub> A en cada caso	Cemento	g. SO <sub>3</sub> que necesitan los g C <sub>3</sub> A	g. SO <sub>3</sub> que había inicialmente	g. SO <sub>3</sub> que necesitan los g. C <sub>3</sub> A	g. SO <sub>3</sub> que había inicialmente
	P-1	2,30	> 1,41 <sup>1*</sup>	1,47	< 4,25 <sup>4*</sup>
	P-31	1,25	< 1,41 <sup>2*</sup>	0,80	< 4,25 <sup>5*</sup>
	PY-6	0,16	< 1,41 <sup>3*</sup>	0,10	< 4,25 <sup>6*</sup>
Cantidad teórica (g) de ettringita formada en cada caso	Cemento				
	P-1	7,26 (hallado por el 1,41 de SO <sub>3</sub> )	<	7,60	(hallado por 1,47 g SO <sub>3</sub> ó 1,66 g C <sub>3</sub> A)
	P-31	6,45 (hallado por el 1,25 g SO <sub>3</sub> ó 1,41 g C <sub>3</sub> A)	>	4,12	(hallado por 0,80 g SO <sub>3</sub> ó 0,90 g C <sub>3</sub> A)
	PY-6	0,82 (hallado por el 0,18 g C <sub>3</sub> A)	>	0,50	(hallado por el 0,11 g. C <sub>3</sub> A)

del P-1, y 1,41g. de  $\text{C}_3\text{A}$  > 0,90g. de  $\text{C}_3\text{A}$ , caso del P-31), se ha formado en proporción, a igualdad de edad del ensayo, mayor cantidad de ettringita/1 g. de  $\text{C}_3\text{A}$  en el 2º caso 21,0% de  $\text{SO}_3$ , que en el primero, 7,0% de  $\text{SO}_3$ , lo cual es lo lógico como se puede confirmar: a) por la estequiometría, ver Tablas 15 y 15 y en especial la primera, donde  $4,58 > 2,49$ , caso del P-1, y  $4,5777 > 4,5745$ , caso del P-31, debiendo ocurrir todo lo contrario por idéntico

razonamiento, para el caso del cemento PY-6 con un contenido muy bajo o nulo (según la técnica analítica empleada para su determinación), como así ha ocurrido en esta parte del trabajo, ver Tablas 15 y 16, pues  $4,55 > 4,54$ .

b) por su análisis semicuantitativo correspondiente, Fig. 10 a) y d)

No obstante y puesto que tanto estos valores de g. de ettringita obtenidos para el cemento PY-6 de contenido muy bajo ó nulo de  $C_3A$ , como los valores correspondientes obtenidos para el cemento P-31 de contenido mediano, 7,63%, de  $C_3A$ , son prácticamente iguales, ver Tabla 16, cabe pensar que el resto de los cementos portland de contenido de  $C_3A$  comprendido entre ambos, los proporcionen iguales también, de donde se deduce la posibilidad real del empleo de tales mezclas-conglomerantes con el 21,0% de  $SO_3$  para ensayos tecnológicos apropiados encaminados a diferenciar los cementos resistentes al ataque de los iones sulfato de los que no lo son, pues en especial los que no lo son tanto, a menor cantidad de cemento empleada de los mismos más cantidad de ettringita forman de este modo,

y posiblemente mayores  $\Delta L/g.$  cemento, originen en sus probetas correspondientes a todas ó sólo determinadas edades del ensayo, de aquí el empleo del método H-I y L-A para tal fin, como así ha ocurrido en este trabajo, véase Deducción X.33<sup>a</sup>.

3<sup>a</sup>.2<sup>a</sup>. Llama poderosamente la atención, por su posible trascendencia tecnológica, el hecho de que en el caso de los cementos elegidos citados de mayor contenido de  $C_3A$ , P-1 y P-31, así ensayados y comparados, la mayor cantidad absoluta y relativa de ettringita en el caso del 21,0% de  $SO_3$  se produce fundamentalmente entre las edades del ensayo de 14 y 730 días, y no entre las de 21 y 90 días como ocurriera en el caso del 7,0% de  $SO_3$ .

Y la razón de ello puede estribar en que cuando existe exceso de  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  y pH adecuado en el medio, caso del 21,0% de  $SO_3$ , la ettringita inicialmente formada



se mantiene tal cual, de aquí que tan sólo en este caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$  se podrá tener la seguridad de que al menos dicha ettringita inicial permanece constante en el tiempo; luego si TODA ella no se pudo formar inicialmente por transcurrir su reacción originaria entre el entramado cristalino diverso de la fase sólida del sistema, obviamente los "restos" de reactivo,  $\text{C}_3\text{A}$ , que inicialmente no la pudieron formar por tal motivo, lo deberán hacer con posterioridad con la progresiva hidratación del sistema pasta de cemento y yeso facilitada por la expansividad que la misma le provoca al estar para entonces bastante menos fraguado y endurecido que inicialmente, debiendo ocurrir lo opuesto en caso contrario. De aquí que en la Fig. 10 d) del 21,0%, todas las curvas aumenten durante todo el ensayo, y más lentamente por la razón dada anterior a partir de las edades de 60 ó 90 días, mientras que en la Fig. 10 a) del 7,0%, las curvas del cemento P-1 y P-31, no, y sí en cambio la del PY-6 por idéntico motivo anterior.

Todo ello se confirma además porque 14,11% de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento P-1, fijaría 12,54% de  $\text{SO}_3$  (>7,0% de  $\text{SO}_3$  presente inicialmente) para pasar íntegramente a ettringita, y el 7,62% de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento P-31 fijaría un 6,77% de  $\text{SO}_3$  (<7,0% de  $\text{SO}_3$  presente inicialmente) para el mismo fin, pero por los sulfato-ferritos de calcio hidratados correspondientes que también se forman se puede hacer prácticamente igual al 7,0% de  $\text{SO}_3$  ó quizás algo inferior. Es decir, en ambos casos faltaría yeso,  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ , para en teoría, mantenerse tal cual, y no como Fase AFm, la ettringita inicialmente formada, la cual persiste mayoritariamente durante todo el ensayo. Ello da pie por tanto a pensar en la posibilidad de que la expansividad de la ettringita adscribible al modelo through-solution, para poder ser total en toda la masa debería serlo fraccionadamente por zonas puntuales uniformemente repartidas, es decir, la resultante de la suma de los infinitos mecanismos similares repartidos puntual y homogéneamente por toda ella, los cuales podrían

ser en tal caso asimilables igualmente al modelo topocéfico o reacción sólido-líquido con ó sin disolución previa por las posibles razones que se apuntan más adelante en el apartado del método L-1 aplicado a todos los cementos P ó PY sólo ó de mezcla de este trabajo y/o en conjunto a la suma total, ó no, de ambos modelos, pero, al parecer, con mayoría de este último sobre aquél.

Por lo tanto y en definitiva del presente estudio comparativo se deduce pues que al comparar las Figs. 2 a) y b) se observa como

- (a) mientras las curvas correspondientes al cemento portland PY-6 con 7,0% ó 21,0% de  $\text{SO}_3$  tienen una creación, evolución y desarrollo bastante aproximada -aumento, en mayor o menor medida, de su pendiente respectiva conforme transcurre el ensayo-,
- (b) las correspondientes al P-1 y P-31, respectivamente, no, pues mientras
  - con el 7,0% de  $\text{SO}_3$  aumenta la pendiente de ambas curvas hasta alcanzar un valor máximo a la edad común de 21 días para disminuir suavemente a continuación hasta la finalización del ensayo a los 730 días,
  - con el 21,0% de  $\text{SO}_3$ , no ocurre esto último y si en cambio únicamente lo primero, es decir aumento sinuosamente generalizado, hasta el punto de que los mayores valores de intensidad se alcanzan entre las edades intermedias y finales del ensayo, o sea, entre las edades de 90 -caso del (P-1)- y 730 días -caso del (P-31)-.

Pues bien, todo ello no es mas que una manifestación clara y expresa del grado de estequiometría alcanzado en cada caso, pues sabido es que las dosificaciones de materiales realizados y expuestas en la Tabla 4 han obedecido bastante mas a razones puramente tecnológicas que estequiométricas. Tales razones necesariamente se han de encontrar contrapuestas en función de la durabilidad de las obras que se ejecutan en la realidad con los cementos portland. Por esta razón el hecho común acaecido a las curvas del PY-6, caso (a), anterior, ha de obedecer a que al poseer dicho cemento PY-6 poca cantidad de  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\approx 1,0\%$  según se dijo antes, lógicamente con ambas cantidades de  $\text{SO}_3$ , 7,0% y 21,0%, con las que se anasó, la reacción de formación de su total de ettringita respectiva, en su conjunto, será excedentaria en  $\text{SO}_3$ , o sea, en yeso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , en ambos casos ( $1,0\% \text{C}_3\text{A} < 0,869\% \text{SO}_3$ ), aunque no obstante en el primer caso, 7,0% de  $\text{SO}_3$ , se deberá formar mayor cantidad de ettringita que en el segundo, 21,0%  $\text{SO}_3$ , pues por estequiometría y en un sentido aproximado se deberá originar que:

$$17,86 \text{ g PY-6} \times 0,01 = 0,1786 \text{ g C}_3\text{A} < 0,3414 \text{ g CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 0,9177 \text{ g ettringita total a formar}$$

$$11,43 \text{ g PY-6} \times 0,01 = 0,1143 \text{ g C}_3\text{A} < 0,2135 \text{ g CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 0,5233 \text{ g " " " "}$$

Y esta misma relación se cumple entre las áreas limitadas por las curvas respectivas, observese y compárense ambas en las Figs. 2 a) y b).

Por lo tanto de esto cabe deducir que en aquellas dosificaciones excedentarias en yeso (o lo que es lo mismo deficitarias en  $\text{C}_3\text{A}$  asegurándose con ello la estequiometría en este reactivo), una vez alcanzada su estequiometría, las pendientes de sus curvas correspondientes representativas deberán aumentar por lo general, con el transcurso del ensayo, como así ha ocurrido en este trabajo con el P-1 y P-31 con 21,0% de  $\text{SO}_3$ , véase todo lo dicho al respecto antes, en esta interpretación.

Y por deducción a la inversa, a aquellas otras dosificaciones deficitarias en yeso (o lo que



es lo mismo excederías en  $C_4AF$  deberá ocurrirles todo lo contrario,

- o bien disminuir desde el origen la pendiente de su curva representativa, hecho éste imposible, pues ello supondría que este tipo de materiales tendrían una velocidad de reacción "relámpago" ó al menos semejante a la de los materiales explosivos tradicionales, o superior incluso, no dando tiempo a trabajar ni racionalizar en todo y forma, su uso común en obras civiles,
- o bien aumentar en un principio hasta una edad dada para seguidamente disminuir claramente en mayor o menor medida, como así ha ocurrido en este trabajo con el P-1 y 7,0% de  $SO_3$ , véase todo lo dicho al respecto antes en esta interpretación; y del mismo modo ha debido ocurrirle al P-31, pues no se olvide que la pequeña cantidad de  $SO_3$  del 7,0% inicial que ha debido de ser fijada por su 11,56% de  $C_4AF$  correspondiente (cantidad ésta de  $C_4AF$  notablemente mayor que la del P-1, 5,33%, y ligeramente mayor que la del PY-6, 10,19%),

deberá poner al borde de la estequiometría perfecta a dicho P-31 e incluso quizás también en situación ligeramente deficitaria en  $SO_3$ , o sea de yeso, al igual que el P-1 acabado de ver, hecho éste muy posible en vista de que la evolución y desarrollo de su curva correspondiente, Fig. 1 a) el P-31, a lo largo del ensayo, es semejante a la de este último P-1, en esa misma Fig. 1 a); y como confirmación de ello está el hecho de que por los correspondientes cálculos estequiométricos al  $C_4AF$ , los 18,51 g de P-31 con 11,56% de  $C_4AF$  necesitarían 1,30 g de  $SO_3$  (ó mejor su equivalente en yeso) para pasar a ettringita de Al mas ettringita de Fe, los cuales al consumirse en un tiempo de 6 a 12 veces mayor que los del  $C_3A$ , hará que en las primeras edades (21 días para el caso que nos ocupa, Fig. 2 a)) se hayan podido fijar de 1/6 a 1/12 de 1,30 g de  $SO_3$ , o sea, de 0,22 g a 0,11 g de  $SO_3$ , que sumados al 1,25 g de la Tabla 4 darían 1,47 g > 1,41 g. y 1,36 g < 1,41 g., cantidades ambas que afirman la presente hipótesis.

VII.4.1.2.- De las Pozolanas D, C, A, C ó M, con  $Ca(OH)_2$  R.A. y con 7,0% y 21,0% de  $SO_3$ , respectivamente. Estudios comparativos correspondientes de éstas entre sí y frente a aquellos.

19.- Pozolanas D, C, A, C y M, con  $Ca(OH)_2$  R.A. y con 7,0% de  $SO_3$ , Fig. 10 b)

#### Discusión VII.4.1.2.12

19.12. En todas ellas excepto en la A (véase discusión 5ª siguiente), se observa que al contrario de lo que ocurriera con los cementos portland P-1, P-31 y PY-6 con 7,0% de  $SO_3$ , se alcanza un notable máximo de formación de ettringita a la edad del ensayo de 14 días, 21 días en la D, es decir, unos siete días, al menos, antes que para el caso visto de los cementos portland citados.

19.22. Seguidamente se origina en todas, excepto en la A, una disminución ó mínimo de formación de ettringita, bien a la edad del ensayo de 21 días, caso de la pozolana M ó a la de 28 días, caso de la C y D.

19.32. A continuación se alcanza un segundo máximo de formación de ettringita, en ciertos casos, ligeramente superior al primero, caso de la pozolana C.

19.42. Finalmente y tras dicho segundo máximo de formación de ettringita, en algunos casos, la misma continúa ascendiendo, A y C, mientras que en otros no, D, O y M.



13.5ª. La formación de ettringita en el caso de la puzolana A, es en general de tendencia claramente ascendente a lo largo de todo el ensayo pero sin parecerse en su fase de crecimiento, hasta la edad del ensayo de 90 días, al del resto de las puzolanas así ensayadas y comparadas, y sí en cambio en su fase de mantenimiento hasta final del ensayo.

#### Interpretación VII.4.1.2.1ª

Antes de todo, se desea hacer saber que la numeración adjudicada a cada interpretación se corresponde numericamente con las de las discusiones anteriores.

1ª.- La relativa rapidez -siete días de adelanto respecto a la de origen  $C_3A$  de los cementos portland comparados-, y coincidencia, en la formación de un máximo inicial de ettringita en la mayoría de las puzolanas excepto la A, así ensayadas, puede ser debido a que los compuestos  $Al^{3+}$ , generalmente como  $Al_2O_3^{r-}$  en las puzolanas, se deben de encontrar en unas condiciones de reaccionabilidad tales que se forma ettringita en mayor cantidad y menor tiempo que en los correspondientes a los  $C_3A$  de los cementos portland.

2ª.- El distinto comportamiento de la puzolana A, al resto, en la creación, evolución y desarrollo de la ettringita a sus expensas durante el transcurso del ensayo, puede ser debido a que la  $Al_2O_3^{r-}$  de dicha puzolana parece que sea algo distinta a la de aquellas igualmente tratadas, pues bien parece como si dicha puzolana A liberase sus correspondientes y mas adecuados compuestos de Al para tal fin, mas lenta y tardamente que lo hacen aquéllas.

Ello puede dar pie a pensar que tales compuestos de aluminio citados de la puzolana A, reaccionan, en una primera etapa, mas difícilmente con el  $Ca(OH)_2$  R.A. (y en una segunda con el  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  agresivo para dar ettringita) -lo cual coincide con los resultados que, a propósito, se han obtenido del ensayo correspondiente de Fratini, ver Fig. 4, en los que esta puzolana A junto con la C, han sido de entre todas las allí ensayadas y comparadas, las que, por lo general mayor  $[CaO]$ , en mM/l, han dejado libre, como  $Ca(OH)_2$ , en su fase líquida respectiva, cumpliéndose ésto mas claramente aún en el caso de que los cementos matrices acompañantes correspondientes, han sido, el PY-4 ó el PY-6, los cuales por su peculiar composición mineralógica,

mayor liberación de portlandita, o mejor, mayor reserva "portlandítica", suelen originar a igualdad de supf.espf.y tiempo de hidratación-, a como lo hacen el resto de las puzolanas de esta otra manera ensayadas y comparadas, y que por tal motivo deben ser energéticamente más estables que los de aquellos; por lo cual los debieran de tener, según todo ello, algo menos vitrificados y por tanto algo mas cristalizados, o pseudo-cristalizados - - (¿ Por mas meteorizados, quizás ?) aunque pese a ello, y al parecer, lenta pero progresivamente lixiviables para dar ettringita.

3ª.- Las alternancias posteriores existentes, de puntos de máximo y mínimo contenido de ettringita, muy probablemente sean debidos:

a) a la existencia de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sobrante durante todo el ensayo, como lo confirman:

- la estequiometría, pues en el peor de los casos, ó de mayor fijación de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 4,78 g. de la puzolana M aportarían 0,0501 g. de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{F-}}$ , que "consumirían" 0,11 g. de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  de los 6,47 g. iniciales, luego sobrarían y mantendrían durante todo el ensayo  $6,47 - 0,11 = 6,36$  g. de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . y

- los gráficos de DRX correspondientes a la edad final del ensayo, en los que se confirma en todos los casos, la presencia de dicho  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sobrante citado anteriormente, véase Gráfico N° 1 b).

b) al pH = 12,3 de la fase líquida, gracias al  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  R.A. aportado, necesario y suficiente para ello.

4ª.- Es de destacar también, que tomando como tipo de actividad máxima, la de la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{F-}}$  de la puzolana M, las puzolanas D, O y C, deben tenerla físicamente del mismo tipo, aunque, en bastante menor cuantía, puesto que la cración, evolución

y desarrollo de la ettringita que forman a lo largo del ensayo, y sobre todo a las edades iniciales, inclusive hasta la de 60 ó 90 días, del mismo, tienen cierta similitud (no así a las finales) en el caso de la C probablemente por su mayor contenido de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  sobre las demás.

- 5ª.- Por el contrario aquellas otras puzolanas, caso de la A, cuya  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  parece ser algo distinta (¿menos reactiva por ser algo mas cristalina?) que la de las demás, a todo lo largo del ensayo, origina un aumento continuado de formación de ettringita, algo retardado respecto a la de las anteriores citadas, quizás por la razón apuntada anteriormente de su probable mayor fracción pseudo-cristalina que el resto.

2ª.- Puzolanas D, O, A, C y M con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  R.A. y 21,7% de  $\text{SO}_3$ , Fig.10e)

#### Discusión VII.4.1.2.2ª

- 2ª.1ª. En todas ellas se observa, que al contrario de lo que ocurriera con los cementos portland P-1, P-31 y PY-6 con 21,0% de  $\text{SO}_3$ , cuyo primer máximo de ettringita se ha formado entre las edades de 14 y 60 días, y el segundo entre la de 60 y 730 días, en este caso se puede decir que existe tan sólo un notabilísimo gran máximo de formación de ettringita entre las edades de 7 y 28 días -superior en la mayoría de los casos (excepto el de la puzolana D, que al ser eminentemente silícica, no entra en esta comparación), llegando a bastante superior en alguno de ellos, caso de las puzolanas M, C y A en general y M en particular-, a partir de cuya edad disminuye notoriamente y aproximadamente hasta la mitad del mismo, manteniéndose con mayores ó menores oscilaciones, según los casos, hasta la edad final del ensayo.

De todo lo cual cabe destacar también aquí, que tales máximos de formación de ettringita de origen  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de cada puzolana, se origina al menos siete días antes que los correspondientes de origen  $\text{C}_3\text{A}$  de los cementos P-1, P-31 y PY-6 ensayados y comparados con aquellos.

- 2ª.2ª. En este caso se puede decir otro tanto a lo dicho en la Discusión 2ª de los cementos elegidos P-1, P-31 y PY-6

con 7,0% de  $\text{SO}_3$ , sobre la forma acampanada de las curvas correspondientes a las puzolanas elegidas D, O, A, C y M, y así ensayadas, la cual, a diferencia de aquellos, adopta,

- mas claramente la forma acampanada o gaussiana correspondiente en su pico, entre similares edades iniciales, y
- su línea base no es ascendente con el transcurso del ensayo, sino que por el contrario mantiene una relativa horizontalidad, con ciertos altibajos, notables en la A a lo largo del mismo.

2ª.3ª. Las puzolanas O, A y C alcanzan su máximo de formación de ettringita a la edad del ensayo de 21 días, a diferencia de la M y D que lo alcanzan a la de 14 días.

Por otra parte y excepto la puzolana M que se mantiene, en el resto, O A y C, se produce un retraso de 7 días, respecto al correspondiente al del 7,0% de  $\text{SO}_3$ , en la consecución del primer máximo respectivo de ettringita, mientras que en la D es de adelanto.

#### Interpretación VII.4.1.2.2ª

Para poder interpretar las discusiones 1ª y 2ª anteriores, vale aquí lo dicho para el caso homónimo del 7,0% de  $\text{SO}_3$ .

Por el contrario la Discusión 3ª induce a pensar que las  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de tales puzolanas M y D, aún siendo cuantitativamente muy diferentes, cualitativamente puede que no lo sean tanto, de aquí que puedan ser mas amorfas y/o vítreas concretamente, que las correspondientes a las puzolanas O, A y C.

3ª.- Estudio Comparativo de las Puzolanas D, O, A, C y M, con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y 7,0% ó 21,0% de  $\text{SO}_3$ , Fig. 10 b) y e)

3ª 1ª. La cantidad de ettringita formada por cada puzolana, excepto la M, con 7% de  $\text{SO}_3$ , debe ser, por lo general, a igualdad de edad del ensayo excepto la de 21 días, ligeramente superior a la que forma con el 21,0% de  $\text{SO}_3$ , lo cual es lo lógico dado el aumento absoluto de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de un caso, 7,0% de  $\text{SO}_3$ , al otro, 21,0% de

$\text{SO}_3$ . De aquí que ello induzca a pensar que,

- o bien al enfrentarse todas las puzolanas así ensayadas a idéntica cantidad de yeso, cada una de ellas origina su correspondiente y distinta cantidad de ettringita proporcional a su cantidad respectiva de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  constitutiva aportada en cada caso, confirmándose en ambos la primacía de la puzolana M sobre el resto, de las así también ensayadas y comparadas con ella, las cuales le precederían a gran distancia por este orden, C y A ó A y C, O y D,
- o bien al haber mas  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en el medio en el caso del 70% de  $\text{SO}_3$  que en el caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$ , el pH se mantiene mas fijo, constante e idóneo en el tiempo dando oportunidad de este modo a una mas y mejor activación de los componentes aluminicos de la puzolana las cuales originarán mayor cantidad de ettringita,
- o bien ambos anteriores a la vez, en mayor ó menor cuantía.

3º.2º. Por otra parte la consecución del primer máximo de formación de ettringita por cada puzolana en cada caso, no se verifica a una edad común para todas, de modo y manera que,

- con la puzolana M se ha producido coincidencia de edades, en ambos casos, edad de ensayo de 14 días,
- con las puzolanas, O, A y C, se ha producido un adelanto de 7 días, del 7,0% al 21,0%, y
- con la puzolana D, se ha producido un retraso de 7 días, del 7,0% al 21,0%.

La razón de ello puede estar en que dada la gran cantidad de la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la puzolana M (difícilmente meteorizada...) sobre el resto, las condiciones de pH, selenitas y estequiométricas, en ambos casos, deben ser, aunque distintas, necesarias y suficientes para ello. Por el contrario al tener menor actividad, cuali y cuantitativamente, la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de las puzolanas A, O y C (¿por mas, que menos, meteorización en dicho orden?),



sólo unas condiciones de pH y selenitosas, amén de estequiométricas, adecuadas, podrían facilitar mas y mejor, la formación de su total ettringita respectiva, como ha debido suceder en este trabajo.

Por otra parte y concretándose al caso particular de la puzolana M, el hecho de que por DRX paradójicamente haya aparecido, especialmente durante las edades iniciales del ensayo y hasta la edad de 28 días, menores cantidades de ettringita en el caso del 7,0% de  $\text{SO}_3$  que en el del 21,0% de  $\text{SO}_3$  -junto a una bastante menor fraguabilidad de este último sobre el primero-, en contra de lo que por estequimetría cabía esperar (0,6075 g. de ettringita que debería haberse formado en el primer caso, del 7,0% de  $\text{SO}_3$ , por 0,3926 g. en el segundo caso, 21,0% de  $\text{SO}_3$ ), hace pensar en la posibilidad de que la expansividad inherente de la formación de ettringita y adscribible al mecanismo de through-solution<sup>8\*</sup>, se ve menos favorecida en el primer caso, 7,0% de  $\text{SO}_3$ , que en el segundo, 21,0% de  $\text{SO}_3$ , posiblemente por la menor fraguabilidad apuntada, tanto per se como adicional de su ettringita, de este último sobre el primero, que aún dentro de su innata lejanía, se encuentra bastante mas cercano a la realidad, de la preparación de morteros y/u hormigones tradicionales de cemento, que el segundo.

Y por último, el retraso mostrado por la puzolana D, se puede deber al hecho de que tanto la mayor presencia de la misma, así como las mejores condiciones de pH y selenitosas del medio, en el caso del 7,0% de  $\text{SO}_3$ , que en el caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$ , deben facilitar el que los geles tobermoríticos de neoformación y origen puzolana D puedan ser los mas adecuados en el caso del 7,0% de  $\text{SO}_3$  que no en el del 21,0% de  $\text{SO}_3$  (C/S, baja), para dificultar el trasiego iónico y retrasar ¿impedir, quizás?, de algún modo, la formación de tal cantidad de ettringita, que de ella misma (¿ó de cualquier otro origen?), puede derivarse en este caso concreto, según lo dicho en la Discusión 4ª del apartado anterior y su interpretación correspondiente para dicho caso del 7,0% de  $\text{SO}_3$  en exclusiva. Además el haberse repetido

este hecho, como se verá en el caso de que dicha puzolana D estuvo acompañada por el cemento matriz PY-6 en el cemento de mezcla PUZ PY-6/D 70/30 correspondiente, amplía quizás la posibilidad apuntada del probable comportamiento específico de cada tipo de gel  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de la puzolana D, en el sentido de que aunque en tales casos citados, cemento PY-6/D 70/30 con 7,0% ó 21,0% de  $\text{SO}_3$ , dichos geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  respectivos fueran iguales a cuando la puzolana D estuvo sola, lo que ya no sería igual es la cantidad total de ettringita formada correspondiente, la cual sería lógica y respectivamente mayor en ambos casos que cuando la puzolana D estuvo sola, pues la ettringita de origen fracción cemento matriz PY-6 aunque pequeña como la de origen puzolana D, también cuenta. Y ante estas nuevas cantidades pequeñas de ettringita total formada en cada caso, pero mayores respectivamente a cuando la puzolana D estuvo sola, puede que dichos geles tobermorífticos antes citados de seguir siendo "adecuados" en "calidad" y "cantidad", lógicamente lo deberían seguir siendo más, en aquel caso en el que en proporción mas puzolana D exista (véase Tabla 14) y menos ettringita total se forme, el cual no debe ser otro que el de tal puzolana sola con el 7,0% de  $\text{SO}_3$ , pues si bien en el caso del cemento de mezcla PY-6/D 70/30 con 7,0% de  $\text{SO}_3$  es en el que mayor cantidad de puzolana D existe, 5,28 g, no es menos cierto que en el mismo y como se ha dicho antes, mayor cantidad de  $\text{ett-Total} = \text{ett-rf (de D)} + \text{ett-lf (de } \text{C}_3\text{A del PY-6)}$  se debe de formar, por lo que para la misma tal cantidad 5,28 g. de puzolana D -y de geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  derivados-, ya no deberán ser la suficiente para retrasar-impedir su formación, y si en cambio y por todo lo contrario cuando tal puzolana actuó sola con 7,0% de  $\text{SO}_3$  como así al parecer ha debido ocurrir en este trabajo.

3<sup>a</sup>.3<sup>a</sup>. Continuando con lo anterior y según lo dicho en el correspondiente estudio comparativo realizado para los cementos P-1, P-31 y PY-6 así ensayados (con 7,0% y 21,0% de  $\text{SO}_3$ ), a la vista del estudio comparativo que aquí se realiza entre las figuras de las puzolanas solas con el 7,0% y el 21,0% de  $\text{SO}_3$ , respectivamente, cabe decir otro tanto. Y es que al ser, por lo general, según el punto anterior, las diferencias entre ambas curvas representativas respectivas, pequeñas en valor absoluto, en potencia, la cantidad de ettringita formada en el caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$  es superior a la originada en el caso del 7,0% de  $\text{SO}_3$ , lo cual se confirma por lo ocurrido paradójicamente a la edad de ensayo

de 21 días para las puzolanas O, A y C, ó 14 días para las puzolanas M y D, ver Fig. 10bly del 7,0% y 21,0% de  $\text{SO}_3$ , y además se confirma por estequiometría, puesto que para el caso mas favorable de la puzolana M (que es la que al parecer mas  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{F-}}$  debe tener, dentro de la poca cantidad que tienen todas ellas) debiera haber ocurrido lo siguiente en cada caso:

- a) la puzolana M con 7,0% de  $\text{SO}_3$  debería haber formado  $\approx 0,61$  g. de ettringita y  $6,47 - 0,11 = 6,36$  g. de  $\text{SO}_3$  sobrante lo cual daría,  $\frac{6,36}{0,61} = 10,43$  g.  $\text{SO}_3$ /1 g. de ettringita formada de tal origen, y
- b) la puzolana M con 21,0%  $\text{SO}_3$  debería haber formado  $\approx 0,39$  g. de ettringita y  $4,20 - 0,07 = 4,13$  g. de  $\text{SO}_3$  sobrante lo cual daría,  $\frac{4,13}{0,39} = 10,59$  g.  $\text{SO}_3$ /1 g de ettringita formada de tal origen,

de donde se infiere que la mayor presencia de yeso en el caso b) ha de impedir mas y mejor que la ettringita formada en el mismo pueda pasar mayoritariamente a Fase AFm,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ , etc...., manteniéndose al menos tal cual y por mas tiempo durante el ensayo, y si se mantiene por tal motivo, toda la escasa que aún se pueda ir formando durante el mismo incrementará a aquella como así ha ocurrido por lo general en esta parte del trabajo con 21,0% de  $\text{SO}_3$ .

De aquí que la expansividad de la ettringita adscribible al mecanismo de through-solution, para poder ser total en toda la masa, deberá de serlo fraccionadamente por zonas puntuales uniformemente repartidas, es decir, la resultante de la suma de los infinitos mecanismos, similares repartidos puntual y homogéneamente por toda ella, los cuales podrían ser en tal caso asimilables igualmente al modelo to-poquímico o reacción sólido-líquido con disolución previa y/o en conjunto a la suma total ó no de ambos modelos de expansividad citados, pero al parecer, con mayoría de este último sobre aquél.

De todo lo cual se concluye :

- 1º.- Que la cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  presente en el ensayo así como su repercusión en el mantenimiento del pH necesario del medio, es determinante, entre otros, para la formación de una mayor cantidad de ettringita de cualquier origen y/o etiología.
  - 2º.- Idem de la cantidad de yeso en el medio, para al menos mantener por mas tiempo y con pH adecuado la ettringita inicialmente formada, así como facilitar su formación disminuyendo la fraguabilidad del mismo.
  - 3º.- Que al parecer, de toda la  $\text{Al}_2\text{O}_3$  constitutiva de una puzolana tan sólo una pequeñísima parte debe estar como reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r}}$ , lo cual se confirma por la propia puzolana M (metacaolín cuarzoso impuro preparado y empleado para este trabajo), pues es bien sabido de todos que no toda la  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de un metacaolín es reactiva, sino sólo una pequeñísima parte, que en el caso de que se tratase de metacaolín de una gran pureza ascendería a lo sumo de un 2,05% a un 2,10%.
  - 4º.- Al parecer el comportamiento puzolánico de la puzolana D sola con  $\text{Ca(OH)}_2$  y 7,0% de  $\text{SO}_3$ , ha retrasado (¿impedido quizás?) en 7 días respecto al caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$ , la aparición del primer máximo de ettringita que de ella pudo derivarse, no confirmándose este hecho cuando se ensayo del mismo modo en forma de cemento de mezcla PY-6/D 70/30.
  - 5º.- Que no queda totalmente aclarado que el único mecanismo de expansividad inherente a la formación de ettringita sea el de through-solution, y si en cambio quizás la resultante sumatoria con algún(os) otro(s) ocurribles, o no, al mismo tiempo.
- 4º.- Estudio Comparativo de los Cementos P-1, P-31 y PY-6, y las Puzolanas, D, O, A, C y M, ensayados solos, o sea por separado, Fig. 10 a), b), d) y e).
- 4º.1º. Tanto en un caso, 7,0% de  $\text{SO}_3$ , como en otro 21,0%  $\text{SO}_3$ , las puzolanas estudiadas, excepto la D, dan lugar a una formación mas rápida, por lo general de 7 a 14 días,

de ettringita, y en ocasiones, caso de la puzolana M, en mucha mayor cuantía que los cementos portland citados, pese a estar presente en menor valor absoluto, de lo cual cabe deducir que la disposición de los iones  $Al^{3+}$  de la  $Al_2O_3$  de las puzolanas para formar mas rapidamente ettringita en un medio selenitoso apropiado, es mejor y mas apropiada, que los del  $C_3A$  de los cementos portland.

VII.4.1.3.- De los Cementos Pozolánicos, PUZ, PY-6/D 70/30, PY-6/O 70/30, PY-6/A 70/30, PY-6/C 70/30 y PY-6/M 70/30, sólo 6 de forma individualizada, con 7,0% y 21,0% de  $SO_3$ , respectivamente. Estudio comparativo correspondiente:

1º.- Cementos Pozolánicos PY-6/D 70/30, PY-6/O 70/30, PY-6/A 70/30, PY-6/A 70/30, PY-6/C 70/30 y PY-6/M 70/30 con 7,0% de  $SO_3$ , Fig. 10 c)

Discusión VII.4.1.3.1º

1º.1º. En todos ellos se alcanza un primer máximo de formación de ettringita en las primeras edades del ensayo distinta de uno a otro de modo y manera que:

- a la edad de ensayo de 7 días lo alcanzaron, el PY-6/M PY-6/C y PY-6/O,
  - a la edad de ensayo de 14 días, lo alcanzó, el PY-6/D
  - a la edad de ensayo de 21 días, lo alcanzó, el PY-6/A,
- siendo destacable en todos los casos que dicho máximo - que en valor absoluto es, superior al del cemento matriz PY-6 solo, y del mismo o parecido orden de magnitud al de la puzolana respectiva sola-, se alcanza, por lo general, algunas fechas antes, unos siete días, que cuando el cemento matriz ó la puzolana se encontraban solos.

1º.2º. A continuación, casi todos los cementos de mezcla PUZ anteriores, tienen un descenso, mas que notable, de formación de ettringita, al igual que ocurriere en el caso de las puzolanas solas, cuyo mínimo se alcanza a la edad de ensayo de 28 días en ambos casos, comparados, de cementos de mezcla y puzolanas solas, excepto para el caso del cemento de mezcla PY-6/L que se alcanzó a la edad del ensayo de 90 días.

1ª, 3ª. Finalmente y con alternancias sucesivas no uniformes en el tiempo, se mantiene en todos los casos, el tono medio general del contenido de ettringita respectivo,

- bien por reposición continuada del mismo, hecho bastante improbable,
  - por la relativa rapidez con que las puzolanas forman su ettringita correspondiente, y
  - por la escasez de  $C_3A$  ( $\approx 0,7\%$ , en el supuesto de que posea  $\approx 1,0\%$  de  $C_3A$ ), aportada al sistema por el cemento matriz PY-6,
- bien por mantenimiento de la pre-existente, con  $pH = 12,5$  y contenido de  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , necesario para ello, ó
- bien por ambos, en mayor o menor medida.

No obstante, se ha de destacar el hecho de que en el caso de cemento de mezcla PY-6/D, dicho tono sea ascendente ó de aumento sinuoso de formación de ettringita en especial hasta la edad de 270 días, para descender lentamente hasta la edad final del ensayo pero sin que por ello el valor correspondiente a esta última edad deje de ser superior al de la edad de 1 día, lo cual confirma el tono ascendente general existente, citado al principio.

#### Interpretación VII.4.1.3.1ª

De la discusión 1ª se puede decir que,

- o bien la portlandita "naciente" es mas activa que el  $Ca(OH)_2$ -R.A.,
- o bien la portlandita "nace disuelta", saturando de este modo el medio acuoso que la originó, por hidratación del  $C_3S$  y  $C_2S$ , mas rápidamente que lo hiciese el  $Ca(OH)_2$  R.A.

Y el retraso verificado respecto al resto, en el caso del cemento de mezcla PUZ PY-6/D, debe estribar en la acción protectora ya citada (en la razón correspondiente dada a propósito en la parte final de la 2ª discusión del apartado B) 3ª), de los geles  $CSH_{102}$  de la puzolana D que dificultan de algún modo que el proceso global de formación y evolución de

la ettringita a formar, se verifique normalmente, y si en cambio con el retraso denunciado, véase a propósito la parte final de la interpretación VII 4.1.2.2<sup>o</sup>.3<sup>o</sup>.2<sup>o</sup>. No obstante y en cualquier caso, resulta evidente que la hidratación selenitosa conjunta y respectiva del  $Al_2O_3$  de las puzolanas O, A, C y M y el  $C_3A$  ( $\approx 0,7\%$  ya que el cemento PY-6 tiene  $\approx 1,0\%$  de  $C_3A$ ) de la fracción clínker del PY-6, se acelera mutuamente en especial esta última, originándose, según parece una potenciación de los efectos resultantes, en este caso una formación mas rápida de ettringita, lo cual está de acuerdo con las conclusiones obtenidas por otra vía por Takemoto, Uchicawa y Uchida (223), mientras que la razón dada del retraso provocado en el caso del cemento de mezcla PY-6/D respecto de los demás está de acuerdo con la conclusión al efecto obtenida por Grzymek y colaboradores (158) y Collepar-di y colaboradores (128) en sus investigaciones respectivas mas o menos afines.

De la discusión 2<sup>a</sup> se puede decir que tanto la posible aplicación esquemática que Schwiete y colaboradores (58) dan de la formación de ettringita, -de distinto origen y etiología en este caso-, y Fase AFm, en el proceso de hidratación de los granos de  $C_3A$  del cemento portland para formar sulfato-aluminatos de calcio hidratados,  $\bar{S}ACH$ , como también la afirmación hecha al efecto por Takemoto y Uchikawa y Uchida (223), referente a que a edades posteriores a las iniciales (desde 60 días en adelante), la aceleración inicial de la hidratación selenitosa, se torna en ~~de~~aceleración ó retraso, con las consecuencias pertinentes en la formación continuada de ettringita, pueden ser perfectamente válidas para explicar el proceso. Por otra parte el retraso, diríase que "crónico", originado de nuevo en el cemento de mezcla PUZ PY-6/D 70/30, se explica igualmente por idéntica razón anterior dada al efecto para el mismo.

Y por último de la discusión 3<sup>a</sup> se puede decir que muy probablemente sea debido, en mayor medida, al mantenimiento de la ettringita pre-formada en los momentos iniciales de la hidratación selenitosa del sistema, pues al tener éste suficiente  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  durante todo el ensayo como lo confirma,

- la estequiometría del cemento de mezcla menos favorable PY-6/M, pues de 1,13 g. de  $SO_3$  que tiene inicialmente el sistema se

han de consumir para formar ettringita 0,12 g. por la puzolana M y 0,11 g. por el cemento PY (en el supuesto de que posea  $\approx 1\%$  de C A), es decir 0,23 g.  $\text{SO}_3$ , que restados de los 1,13 iniciales dan  $\approx 0,90$  g. de  $\text{SO}_3$  residual.

- la gráfica DRX de dicho cemento de mezcla PY-6/M a la edad final del ensayo de 730 días Gráfico N° 1 c), en la que se observa el yeso presente; ello y el pH = 12,0 elevado del medio (cemento PY-6 con 79,43% de  $\text{C}_3\text{S}$  y atmósfera  $\text{N}_2$ ) ayudan a su mantenimiento general en todos los casos.

Por otra parte el hecho de que pese a la presencia de la puzolana D se mantenga y aumente la ettringita (siempre en menor medida que en el resto de las puzolanas comparadas) inicialmente formada, apunta la idea de que su sola presencia no es total impedimento en este caso para la nula formación de aquella y dado de que en esta parte del trabajo no se han ensayado, por no ha lugar, mas cementos de mezcla "hermanos", mayores 80/20 ó menores 60/40, del citado cemento de mezcla PUZ, PY-6/D 70/30, se echan de menos elementos de juicio necesarios y suficientes para tener una explicación mas satisfactoria, aunque no obstante mas adelante y en tales circunstancias, y con otros ensayos adicionales, tortas L-A y probetas ASTM C452 se cree que puede que se llegue a completar la explicación aquí iniciada al efecto.

2°.- Cementos Puzolánicos PY-6/D 70/30, PY-6/D 70/30, PY-6/A 70/30, PY-6/O 70/30 y PY-6/M 70/30 con 21,0% de  $\text{SO}_3$ , Fig. 10 f)

#### Discusión VII.4.1.3.2°

1°.- En casi todos los cementos de mezcla se alcanza un primer máximo de formación de ettringita muy notable a la edad del ensayo de 14 días, excepto en el PY-6/M -que se puede calificar de extraordinario en comparación con los anteriores-, y el PY-6/A -que se puede calificar del mismo rango de los anteriores O y C-, que se alcanzan a la edad de 21 días, ocurriendo en ambos casos citados lo mismo, pero 7 días antes, para el caso de la puzolana M, no para la A, que cuando ambas actuaban solas, Fig.10 e)

2°.- Seguidamente la formación de ettringita, en casi todos los casos, tiene un descenso notable, cuyo mínimo se



alcanza a la edad del ensayo de 28 días.

3º.- Finalmente, y con alternancias notables de máximos y mínimos diversos se finaliza el ensayo en una trayectoria ascendente en la formación de ettringita, excepto ligeramente en el caso del cemento de mezcla PY-6/A, alcanzándose unos máximos finales,

- superiores a los iniciales respectivos para el caso de las puzolanas M y C, ó
- mas o menos del mismo rango, para el caso de las puzolanas O, A y D.

#### Interpretación VII.4.1.3.2º

De la discusión 1ª se puede decir que la coincidencia exacta o aproximada de los máximos correspondientes de formación de ettringita, en cada caso comparado, de cemento de mezcla y puzolana sola correspondiente, puede adscribirse,

- o bien a la distinta reactividad del  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A. y la portlandita,
- o bien a la interacción existente, y sus consecuencias, a la hora de formar ettringita, entre el  $\text{C}_3\text{A}$ , y las puzolanas (223),
- o bien a ambas causas anteriores, a un tiempo, en mayor o menor medida.

De la discusión 2ª se puede argüir la misma razón dada para el caso del 7% de  $\text{SO}_3$ . Y por último, la discusión 3ª da pie a poder pensar que, en el caso de las puzolanas M y C así ensayadas, no se alcanzó la estequiometría a las edades iniciales del ensayo, y si en cambio a las finales, mientras que en el resto de las puzolanas igualmente ensayadas y comparadas, D, O y A, si se debió alcanzar, manteniéndose durante el ensayo gracias al  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  residual y  $\text{pH} = 12,1$  adecuados para tal fin, como lo confirma la estequiometría, del cemento de mezcla menos favorable (PY-6/M 70/30), pues 11,24 g del mismo aportan 0,035 g de  $\text{Al}_2\text{O}_3^-$  para consumir 0,08 g de  $\text{SO}_3$  de los 4,20 g puestos inicialmente, luego sobrarán  $4,20 - 0,08 = 4,12$  g de  $\text{SO}_3$  que se mantendrán hasta la finalización del ensayo, debiendo de sobrar más aún en el resto de las puzolanas ensayadas (puesto que menor debe ser aún su contenido de

$\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  respectivo), como se puede comprobar semicuantitativamente en los gráficos de DRX correspondientes, ver

- Los gráficos de DRX correspondientes a la edad final del ensayo de 730 días. Gráfico nº 1, d).

3º.- Estudio comparativo de los Cementos Puzolánicos PY-6/D 70/30, PY-6/O 70/30, PY-6/A 70/30, PY-6/C 70/30 y PY-6/M 70/30 con 7,0% y 21,0% de  $\text{SO}_3$ , respectivamente, Fig. 10 c) y f)

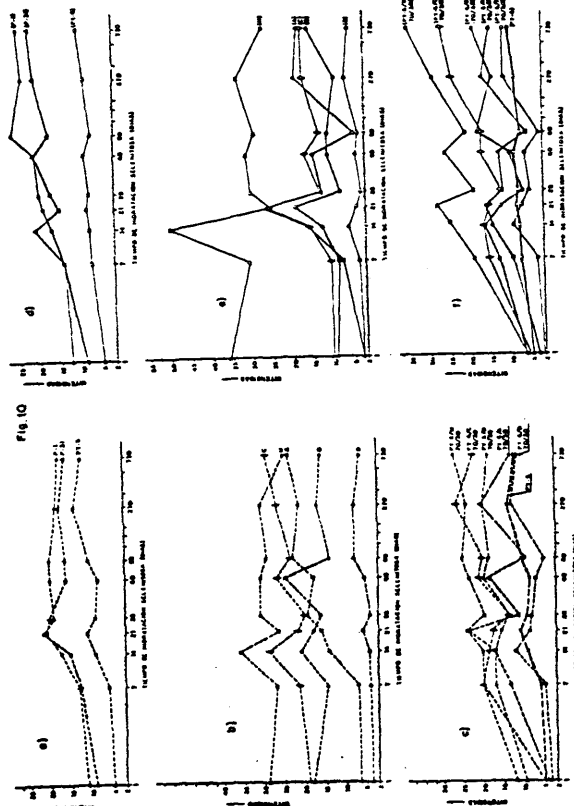
3º.1º. La mayor o menor cantidad de yeso residual presente, bien pre-existente y/o de "re-formación", tiene un papel determinante para la permanencia, ó no, de la ettringita, como tal en el medio, inicialmente formada, de aquí que,

- en el caso del 7,0% de  $\text{SO}_3$ , casi todos los cementos de mezcla PUZ así ensayados y comparados, finalicen el ensayo descendiendo su curva correspondiente de ettringita por ellos formada, excepto el PY-6/C, cuyos componentes alcalinos de la puzolana bien pudieran evitarlo, y
- en el caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$ , al contrario, o sea, aumentando, excepto el PY-6/A, cuyos notables, y quizás especiales, componentes vítreos (no los cristalinicos) de la puzolana, bien pudieran provocarlo.

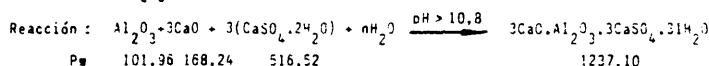
3º.2º. Como se puede comprobar por los gráficos correspondientes, la intensidad de pico de la ettringita originada por cada cemento de mezcla PUZ preparado y ensayado al efecto, no ha resultado ser en ningún caso la "suma exacta" de la correspondiente a la de sus fracciones componentes respectivas solas, dado que las dosificaciones realizadas de los mismos no estuvieron encaminadas a dicho fin sino a la lixiviación máxima posible para dar ettringita del  $\text{Al}^{3+}$  de cada material específico portador y en especial de las puzolanas elegidas ensayadas, de aquí que, como se dijera al principio de este capítulo la elección de su cemento matriz acompañante recayera en el PY-6 dado su muy escaso contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\approx 1,0\%$ .

3<sup>a</sup>.3<sup>a</sup>. Por lo general, a igualdad de edad de ensayo, excepto en ocasiones la de 1 día, la intensidad del pico de la ettringita de origen puzolana M, sólo o en cemento de mezcla PUZ, PY-6/M 70/30, ha resultado ser NOTABLEMENTE SUPERIOR, en ambos casos del 7,0% y del 21,0% de  $SO_3$ , que la correspondiente a cualquiera de los cementos elegidos e igualmente ensayados, P-1 ó P-31 solos.

Ello no coincide en absoluto con lo que cabría esperar de los cálculos teóricos estequiométricos realizados al efecto de sus dosificaciones respectivas, ya que según los mismos, la cantidad de ettringita que se debería formar en cada caso concreto habría de ser:



a) a partir del  $Al_2O_3^{r-}$  (cálculos en tanto por uno)



\* Consideraciones Previas:

1ª.- Como se sabe, un metacaolín bastante puro tiene normalmente de 2,05% a 2,10% de  $Al_2O_3^{r-}$  y mas concretamente alrededor de 2,08% de  $Al_2O_3^{r-}$ .

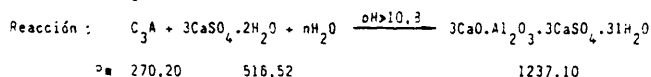
2ª.- La puzolana M empleada en este trabajo tiene al menos una riqueza en M del 50,25%.

3ª.- La cantidad de puzolana M empleada en preparar los Fratinis "selenitosos", del 7,0% de  $SO_3$  ó 21,0% de  $SO_3$ , con mezcla-conglomerante, cemento de mezcla PY-6/M 70/30 mas yeso, ha sido respectivamente,  $17,57 \times 0,3 = 5,271$  g y  $11,24 \times 0,3 = 3,372$  g.

4ª.- La cantidad de puzolana M empleada en preparar los Fratinis con yeso, 7,0% de  $SO_3$  ó 21,0% de  $SO_3$  con mezcla-conglomerante, puzolana M mas yeso mas  $Ca(OH)_2$ , ha sido respectivamente 4,7813 g y 3,09 g.

17,57 g de PY-6/M 70/30	$\times 0,70 = 12,299$ g de PY-6	$\times 0,01 = 0,1757$ g de $C_3A$	que podrán originar 1,5631 g de ettringita
(con 7,0% de $SO_3$ )	$\times 0,30 = 5,271$ g de M "cuarcoso"	$\times 0,5035 = 2,6540$ g de M "puro"	$\times 0,0228 = 0,05520$ g de $Al_2O_3^{r-}$
			" = 2,5686 g de "
			1,1379 g de ettringita
11,24 g de PY-6/M 70/30	$\times 0,70 = 7,868$ g de PY-6	$\times 0,01 = 0,1124$ g de $C_3A$	" = 0,1124 g de "
(con 21,0% de $SO_3$ )	$\times 0,30 = 3,372$ g de M "cuarcoso"	$\times 0,5035 = 1,6984$ g de M "puro"	$\times 0,0228 = 0,038531$ g de $Al_2O_3^{r-}$
			" = 3,1165 g de "
(con 7,0% de $SO_3$ )	$\times 0,30 = 4,7813$ g de M "cuarcoso"	$\times 0,5035 = 2,4076$ g de M "puro"	$\times 0,0228 = 0,05520$ g de $Al_2O_3^{r-}$
			" = 2,1887 g de ettringita
(con 21,0% de $SO_3$ )	$\times 0,30 = 3,0900$ g de M "cuarcoso"	$\times 0,5035 = 1,5558$ g de M "puro"	$\times 0,0228 = 0,035236$ g de $Al_2O_3^{r-}$
			" = 0,3776 g de ettringita

b) a partir del  $C_3A$  (cálculos en tanto por uno)



(con 7,0% $SO_3$ )	$\Rightarrow 18,35$ g de P-1 $\times 0,1411 = 2,5892$ g $C_3A$	que podrán originar 7,2619 g de ettringita
(con 21,0% " )	$\Rightarrow 11,74$ g de P-1 $\times 0,1411 = 1,6565$ g $C_3A$	" " " 7,5344 g " "
(con 7,0% " )	$\Rightarrow 18,51$ g de P-31 $\times 0,0762 = 1,4105$ g $C_3A$	" " " 6,4578 g " "
(con 21,0% " )	$\Rightarrow 11,84$ g de P-31 $\times 0,0762 = 0,9022$ g $C_3A$	" " " 4,1308 g " "
(con 7,0% " )	$\Rightarrow 17,86$ g de PY-6 $\times 0,01 = 0,1786$ g $C_3A$	" " " 0,8177 g " "
(con 21,0% " )	$\Rightarrow 11,43$ g de PY-6 $\times 0,01 = 0,1143$ g $C_3A$	" " " 0,5233 g " "

De aquí que dada la gran disparidad existente entre lo real y lo teórico, la única explicación posible de tan notables diferencias, es que la actividad de la  $Al_2O_3^{r-}$ , pese a su notable menor presencia que el  $C_3A$  en cualquiera de los casos correspondientes comparados, debe ser de tal magnitud, que forma TODA la ettringita de que es capaz MUCHISIMO MAS RAPIDAMENTE QUE EL  $C_3A$ . Por ello puede decirse con fundamento que dicha notabilísima reactividad de la  $Al_2O_3^{r-}$  se puede deber a encontrarse en el estado físico-químico (amor-

fo?) IDEAL para dicho proceso, mientras que el  $C_3A$  se encontraría en el opuesto, es decir, en el NO IDEAL para el mismo fin, hasta el punto de que el mismo, a tenor de los resultados obtenidos, auto-frena y limita la formación de toda la ettringita que por estequiometría sería capaz de formar.

Todo ello coincide en gran medida con las conclusiones de Takemoto y Uchikawa y Uchida (223), y sobre todo coincide básicamente con los resultados obtenidos por Menta (31) en su estudio, mediante DRX y ME, de la hidratación selenitosa de cementos expansivos M, K y S, donde en igualdad de condiciones, la ettringita de origen CA (compuesto obtenido al tratar adecuadamente el metacaolín con  $CaO$  ó  $CO_2Ca$ ), se forma en los primeros 7 días en mucha mayor cantidad que la de origen  $C_3A$ , y potencialmente, más aún, durante el primer día, incul-pando el autor del retraso notable provocado en la hidratación de este último, a una capa de  $Ca(OH)_2$  que a modo de manto protector recubre los granos de  $C_3A$  impidiéndoles su hidratación continuada, hecho éste no acaecido en los granos de CA el cual con la presencia de dicho  $Ca(OH)_2$  acelera su hidratación.

Esto va en contra de lo anterior así como también de la teoría de Schwiete y colaboradores (58) sobre que el manto o cubierta protectora es de ettringita y no de  $Ca(OH)_2$ , a no ser que las ettringitas de tales orígenes distintos citados,  $C_3A$  y  $Al_2O_3^r$ , sean morfológicamente distintas y mecánicamente diferentes.

Por todo lo cual y pese a lo paradójico, el hecho citado demostrado de que a igualdad de edad del ensayo y en especial las iniciales, la ettringita de origen  $Al_2O_3^r$  de la puzolana es mayor, que la ettringita de origen  $C_3A$  del cemento portland, da pie a poder decir que, por la causa que fuere, la velocidad de formación,  $V_f$ , de la ettringita de origen  $Al_2O_3^r$  de la puzolana debe ser notablemente superior a la velocidad de formación,  $V_f$ , de la ettringita de origen  $C_3A$  del cemento portland.

Por otra parte y finalmente otro tanto se podría decir que ha ocurrido con la puzolana C, cuyo "parentesco" relativo con la M ha quedado, una vez mas, de este modo reflejado.

No obstante, antes de finalizar esta interpretación y desde un punto de vista global se desea llamar la atención de que al igual que ocurriera a la puzolana C respecto de la M a las edades finales del ensayo con  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A. y 7,0% de  $\text{SO}_3$ , véase Fig. 10 b), ocurre potencialmente otro tanto en igual caso comparativo pero con 21,0% de  $\text{SO}_3$ , véase Fig. 10 c), es decir, que la intensidad de pico de la ettringita de origen puzolana M ha descendido respecto a la de la de origen puzolana C que se mantiene prácticamente constante pero de ascendencia creciente, ocurriendo en potencia todo lo contrario a tales edades finales y algunas anteriores en iguales casos comparativos verificados ante la presencia común del cemento portland PY-6 en lugar del  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A.; siendo no obstante tal discrepancia entrambos, en este último caso, mas real que aparente con 7,0% que con 21,0% de  $\text{SO}_3$ , y debiendo estribar de algún modo la existencia de todas ellas en el mayor contenido de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  de la puzolana C sobre las demás ya citada en la conclusión VI.1.2.1.2 (c) 3ª.

Del mismo modo y respecto de la puzolana D se observa como en potencia en el caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$  y cemento de mezcla (PY-6/D 70/30) logra que se forme del mismo, menor cantidad de ettringita total que lo que debería corresponderle en el supuesto teórico de que la misma únicamente pudiese actuar como un  $\text{INERTE}_{\text{PS}}$ , en cuyo caso hipotético la línea quebrada correspondiente al cemento (PY-6) solo, véase Fig. 10 f), debería pasar aproximadamente una tercera parte por debajo de donde ha pasado y no 2/3 partes aproximadamente por debajo de la del (PY-6) sólo, como ha ocurrido en la realidad con la del cemento de mezcla (PY-6/D 70/30), lo cual viene a confirmar el comportamiento de dicha puzolana D en dicha ocasión como tal puzolana. En cambio este hecho no logra confirmar de igual modo en igual caso comparativo con el 7,0% de  $\text{SO}_3$ , véase Fig. 10 c), en el que aproximadamente el comportamiento de la puzolana D parece semejarse en esta ocasión algo mas al de un  $\text{INERTE}_{\text{PS}}$ , pues el descenso provocado de la línea quebrada correspondiente al cemento PY-6 sólo es aproximadamente 1/3 y no 2/3 como en el caso anterior del 21,0% de  $\text{SO}_3$ . Por otra parte tales resultados discrepantes anteriores no logran mantenerse íntegramente de igual e idéntica discrepancia en el caso de la actuación de la puzolana D sola con  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A. en lugar de con cemento portland PY-6.

Pues como en ambos casos comparados de la puzolana D, sola o con el cemento portland PY-6, lo único que los diferencia, entre otros -además de su contenido respectivo de  $\text{SO}_3$  inicial puestoles como agresivo común- es su relación C/S, pues en el supuesto falso (pero favorable para este razona-

miento), de que toda la fracción cemento portland PY-6 fuera  $\text{Ca(OH)}_2$ , el cociente, fracción cemento PY-6 =  $\text{Ca(OH)}_2$ /Puzolana D, en el cemento de mezcla PY-6/D 70/30, sería, en ambos casos del 7,0% y 21,0% de  $\text{SO}_3$ , 2,33, mientras que en el caso de la puzolana D sólo, tal relación  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A./Puzolana D, sería  $2,55 > 2,33$ ; de aquí que la relación C/S de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}$  en el primer caso cemento PY-6/D 70/30 debe de ser menor que la del segundo,  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A./D, y al parecer mas apropiada para provocar mayor impedimento a la formación del total posible de ettringita a formar en el caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$  que no en el caso del 7,0% de  $\text{SO}_3$ , o lo que es lo mismo, que cada cantidad de ettringita total a formar necesita, al parecer, una calidad y cantidad determinadas de geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}$  de la puzolana D para impedir apreciablemente que se forme.

Por último se ha de destacar los hechos comunes respectivos acaecidos entre los conjuntos de curvas a), c), d) y f) por un lado y b) y e) por otro, de la Fig. 1. Y es que mientras en las primeras la pendiente de las curvas aumenta mas o menos sinuosa y suavemente con el transcurso del ensayo, en las segundas dicha pendiente de las curvas tiene un valor próximo a cero, es decir, que la evolución de las curvas guarda, en general y con alticajos, la horizontalidad o paralelismo con el eje de abscisas durante el transcurso del ensayo, excepto la correspondiente a la puzolana A sólo con  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A. y 7,0% de  $\text{SO}_3$ , en el conjunto de curvas b) de la Fig. 1.

Pues bien, la causa ha de estar relacionada necesariamente con la diferencia de velocidad de fraguado y endurecimiento de la fase sólida correspondiente, ya que es sintomático que cuando la misma estuvo constituida, bien total ó parcialmente por cualquier cemento portland de los ensayados, dicha fase sólida tendió a endurecerse desde el comienzo del ensayo y con el transcurso del mismo, tanto más cuanto menor fué el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  y/o  $\text{SO}_3$  de dicha fase sólida (pendiente ascendente), y viceversa. No ocurriendo otro tanto, sino mas bien lo contrario en desigual medida cuando el  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A. estuvo presente, y tanto mas silícica (D) que aluminica (M) era la puzolana constitutiva de la fase sólida y más  $\text{SO}_3$  (en forma de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) la acompañaba.

Por tanto todo ello se puede interpretar diciendo que en los casos a), c), d) y f), el endurecimiento, mayor o menor pero gradativo, de la fase sólida, deberá imponer una velocidad de difusión a su fase líquida hidratante por el sistema capilar de aquélla, de la cual deberá depender la cantidad de formación de ettringita, debiéndose completar la totalidad de la misma a formar en cada caso, con el transcurso del ensayo. De aquí que los máximos valores de intensidad, se hayan alcanzado por lo común entre las edades intermedias y finales del ensayo y mas aún a estas últimas.

Por el contrario, en aquellas otras fases sólidas, casos b) y e) de la Fig. 1, en las que el grado de endurecimiento de las mismas fué menor que el de los casos correspondientes anteriores deberá ocurrir todo lo contrario,

- bien por falta de actividad puzolánica derivada de sus  $Al^{3+}$  adecuados correspondientes, de la  $Al_2O_3^{r-}$ , caso de la D y quizás de la O,
- bien por exceso de actividad puzolánica derivada de sus  $Al^{3+}$  adecuados correspondientes, de la  $Al_2O_3^{r-}$ , caso de la M y C, por este orden de mayor a menor; y dicha  $Al_2O_3^{r-}$  originaría su total de ettringita correspondiente en las primeras edades del ensayo merced a la expansividad de ella derivada, facilitándose de esta manera una mas rápida y total hidratación selenitosa de sus fases sólidas respectivas.

De este modo y en tales casos, el total de ettringita respectiva (máximos valores de intensidad alcanzados) se deberá formar mayormente en las edades iniciales del ensayo y mantenerse prácticamente constante (pendiente = 0) durante el transcurso del mismo, según ha ocurrido en este trabajo.

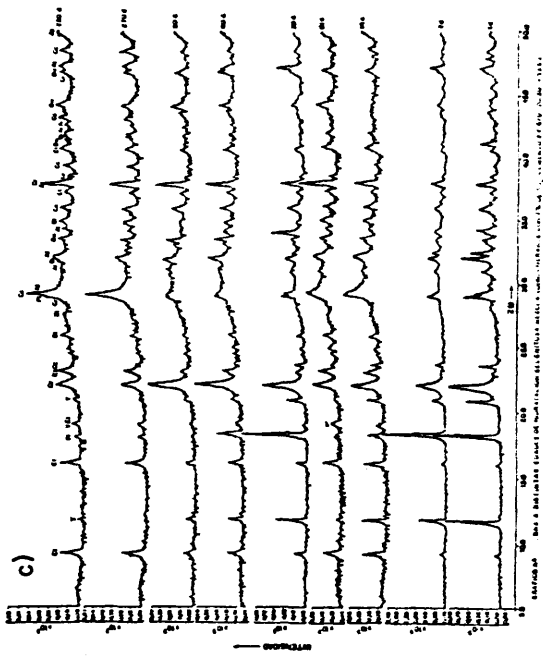
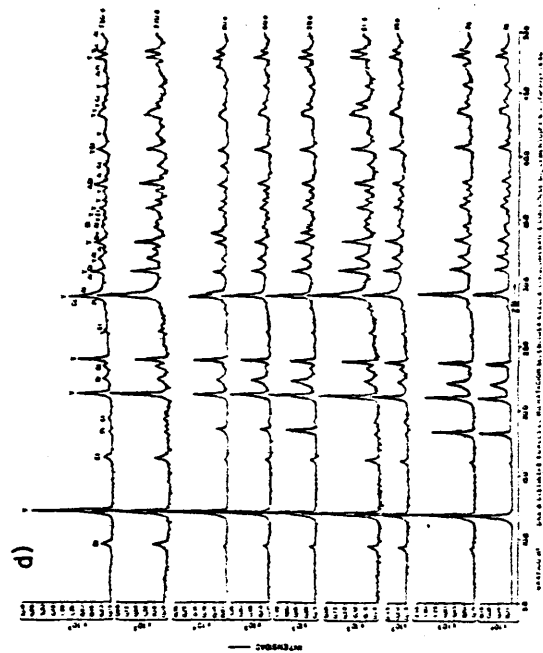
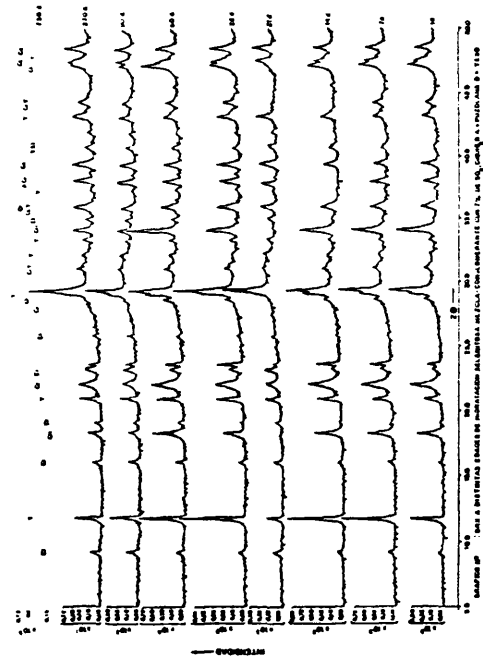
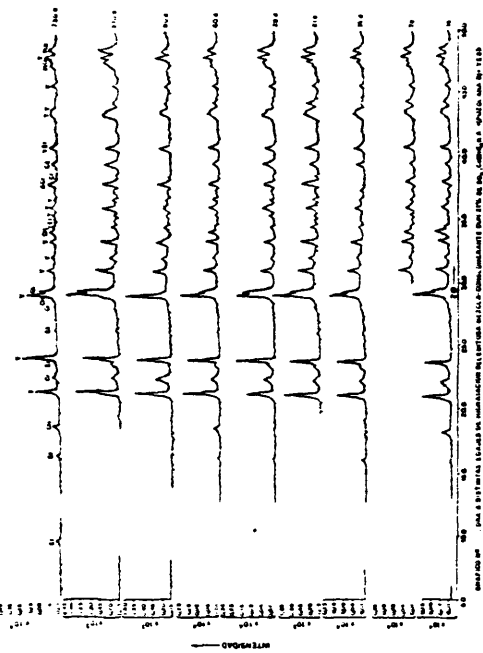
Y a propósito de este último razonamiento pudiera darse el caso de que tras su lectura por la persona que haya de juzgar o consultar este trabajo, la misma achaque a esta última causa la mayor velocidad de formación de la ettringita de origen  $Al_2O_3^{r-}$  de las puzolanas sobre la ettringita de origen  $C_3A$  de los cementos portland estando en contra por tanto de la razón aducida por el autor de este trabajo, con lo que para dicho lector tal mayoría de la velocidad de formación de la ettringita sobre la de la ettringita es mas ficticia que real.

Pues bien a ello se respondería diciendo que si tal fuera la única causa en todos los casos y con mas razón cuanto mas aluminica es la puzolana, a los cementos de mezcla, 70/30, PY-6/D, O, A, C y M, respectivamente, debería haberles ocurrido otro tanto a lo dicho ultimamente en el razonamiento dado a cuando tales puzolanas se ensayaron solas con  $Ca(OH)_2$  R.A. y 7,0% ó 21,0% de  $SO_3$ , ¡Y eso no ha ocurrido!, si no mas bien ha ocurrido la formación de similares grados de endurecimiento a cuando los cementos portland P-1, P-31 y PY-6 se ensayaron solos con 7,0% ó 21,0% de  $SO_3$  respectivamente. Y no se olvide que los cálculos estequiométricos realizados con tales cementos de mezcla han sustentado el penúltimo y principal razonamiento vertido en favor de la hipótesis que se discute, y no en cambio los correspondientes a las puzolanas ensayadas solas con  $Ca(OH)_2$  R.A. y 7,0% ó 21,0% de  $SO_3$ .

No obstante y pese a todo lo anterior, si al que haya de juzgar y/o consultar esta MEMORIA aún no le ha quedado lo suficientemente claro que la ettringita de origen  $Al_2O_3^{r-}$  de las puzolanas ha de tener una notable mayor Velocidad de Formación, Vf, que la ettringita de origen  $C_3A$  de los cementos portland, sea el que fuere el grado del entorno que las rodea en el instante mismo de su formación, véanse a propósito los capítulos venideros, y de ellos especialmente el VIII.1.2.2.2. (L-A) y el VIII.2.2.2.3 (ASTM C 452).



Finalmente y a propósito de todo lo anterior llama poderosamente la atención en esta ocasión la evolución de la curva de la puzolana A, Fig. 1 b), la cual se asemeja mas a los casos anteriores citados de presencia total o parcial de los cementos portland P-1, P-31 ó PY-6, que a éstos. Ello unido a la mayor cantidad de endurecimiento, dentro de lo escaso, de su fase sólida correspondiente, que las del resto de las puzolanas como ella ensayadas y comparadas, viene a demostrar que la cantidad total de ettringita derivada de la A deberá ir formándose en esta ocasión con el transcurso del ensayo y no a las edades iniciales del mismo. Y ello porque no deberá poseer tan apreciables cantidades de  $Al_2O_3^r$  como la C y M para auto-expansionar y anti-endurecer con su ettringita derivada y sí en cambio mayores que la O, la cual por escaso idéntico motivo deberá originar lo opuesto o sea, tendencia a fraguar y endurecer. Esto contradice la hipótesis vertida al respecto entre la A y la O en las pags. 170-172, pudiendo estar quizás la presente, a nuestro parecer, más próxima a la realidad.



VII.4.2.- Conclusiones

- 1ª 1ª.- La cantidad de ettringita formada dependiente de su intensidad de pico 2  $\theta$  = 9,08°, de origen cemento portland, guarda como era lo esperado, una estrecha relación directa con el contenido de  $C_3A$  del mismo. De aquí que la clasificación que se obtendría en función de la misma de mayor a menor por este orden, de los cementos portland P-1, P-31 y PY-6 elegidos y ensayados, sea totalmente coincidente con la que se obtendría en función de su contenido respectivo de  $C_3A$ .
- 2ª 2ª.- TODAS las puzolanas elegidas y ensayadas "han fijado iones sulfato para forma ettringita". A continuación cabe citar aquí la Deducción X, 8ª.
- 7ª 3ª.- El primer máximo de formación de ettringita (y por lo general el mayor de todos) de origen puzolana, suele aventajar normalmente en casi todos los casos -menos en ocasiones el de la puzolana A-, en al menos siete días, al máximo correspondiente de formación de ettringita de origen cemento portland, pese a que por estequiometría debiera ocurrir todo lo contrario; así como también que la mayor parte del total de ettringita a formar por aquellas en el caso del 7,0% de  $SO_3$ , bien solas o mezcladas por separado con el cemento portland PY-6, se origina durante los primeros 21 - 28 días del ensayo.

- 9ª 4ª.- La velocidad de formación  $V_f$ , de la ettringita de origen -  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana, debe ser NOTABLEMENTE SUPERIOR a la velocidad de formación de la ettringita de origen  $C_3A$  del cemento portland.

De aquí que como norma general y en aras de la brevedad, en adelante para reseñar el origen de cada tipo de ettringita y poder diferenciarlas fácilmente, donde y cuando proceda, según el mismo, en cada caso concreto,

- a la ettringita de origen  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana, se le denominará "ETTRINGITA DE RAPIDA FORMACION", y se la simbolizará por "ett-rf",
- a la ettringita de origen  $C_3A$  de cemento portland, se le denominará "ETTRINGITA DE LENTA FORMACION", y se le simbolizará por "ett-lf" (cuando este tipo de ettringita pudiera ser de origen  $C_4AF$ , se indicará expresa y oportunamente),
- a la ettringita suma de ambas anteriores, en su caso, se le

Clasificación Antigua: A ella se hará referencia a lo largo de esta MEMORIA, a partir del Capítulo VIII. en adelante.

Clasificación Nueva :

denominará "ETTRINGITA TOTAL", ó "ettringita TOTAL", y se le simbolizará cuando convenga por "ett-T", y

- a la ettringita de cualquier origen, ettringita ó "ett", pudiendo ser a su vez todas ellas,
- "primaria", "<sup>1</sup>ria" ó "temprana", por corresponderse con los primeros máximos formados de las mismas, en todos los casos, en las edades iniciales del ensayo, ó
- "secundaria", "<sup>2</sup>ria", ó "tardía", por corresponderse con los máximos posteriores formados de las mismas en todos los casos, en las edades intermedias y/o finales del ensayo, no pudiéndose precisar, sólo mediante estos ensayos, el grado de nocividad, ó no, probables de las mismas.

- 3\* 5\*.- La cantidad de ettringita formada (dependiente de su intensidad de pico  $2\theta = 9,8^\circ$ ) de origen puzolana, bien sola o en coyunda con el cemento matriz PY-6, guarda una relación directa con el contenido de  $Al_2O_3$  de la misma, puesto que las clasificaciones que se obtendrían, de menor a mayor por este orden, son prácticamente coincidentes, en especial las de las edades fundamentales del ensayo de 1, 7, 14, 21, 28 y 730 días, véase Tabla 11, con la que se obtendrán en función del contenido de  $Al_2O_3$  (%) respectivo, de menor a mayor valor.

Por otra parte y puesto que dicha ettringita, según el Cap. IV.5.2. y los resultados aquí obtenidos de los cementos de mezcla PUZ al efecto preparados y ensayados, ha de provenir de la  $Al_2O_3^{F-}$  de la puzolana, la clasificación que se debería obtener de tales puzolanas en función de su contenido respectivo de  $Al_2O_3^{F-}$ , de menor a mayor por este orden, habría de ser, véase la Deducción XI, 8\*, debiendo de ser además las ligeras diferencias de  $Al_2O_3^{F-}$  habidas entre las puzolanas O y A, cuali y cuantitativas.

Tal clasificación anterior no se puede verificar al no existir actualmente un método analítico para determinar el contenido EXACTO de  $Al_2O_3^{F-}$ ,  $SiO_2^{F-}$  y  $Fe_2O_3^{F-}$ , en especial el primero, de una puzolana, no siendo ello objetivo de este trabajo.

- 4\* 6\*.- Véase la Deducción X, 11\*.

- 10\* 7\*.- Según lo expuesto anteriormente, la intensidad de pico de la ett-rf, formada por cada una de las puzolanas elegidas y así ensayadas, en las primeras edades del ensayo hasta la de

28 días, podría ser un indicador semicuantitativo y comparativo bastante aproximado del contenido mas probable de  $Al_2O_3^{r-}$  de cada una de ellas, el cual, a tenor de los resultados obtenidos sería el expuesto al final de la Conclusión 5ª.

- 5ª 8ª.- Del estudio individual, comparativo realizado con la puzolana M respecto del resto de las puzolanas elegidas ensayadas, se observa como, las puzolanas C y D, cualitativamente, han de tener su  $Al_2O_3^{r-}$  bastante similar a la de aquella M, aunque en menor cuantía, en especial la D, que ha de tenerla muy escasa; no pudiéndose decir otro tanto de las puzolanas O y A, ni entre sí ni respecto de aquellas, pues al parecer la "calidad" de la O debiera ser superior que la de la A, ¿quizás "reactiva" (de mayor energía de activación y similar a la de la M) la de la O y simplemente "activa" (de menor energía de activación y menor que la de la M) la de la A? O bien quizás todo lo contrario, siendo ello entonces concordante con la mayor cuantía de ésta sobre aquella.
- 8ª 9ª.- Por lo general todas las mezclas-conglomerantes selenitosas con el 21,0% de  $SO_3$  han originado, potencialmente durante el ensayo, una mayor cantidad de ettringita que sus homónimas del 7,0% de  $SO_3$ , causa por la que puede decirse con fundamento que aquéllas se han encontrado más próximas a su estequiometría que éstas. De todo lo cual se desprende la posibilidad real de que aquella mezcla-conglomerante selenitosa del 21,0% de  $SO_3$ , pudiera ser la más apropiada para su utilización en un método acelerado de ensayo.
- 6ª 10ª.- Como se esperaba, no se ha cumplido con "exactitud matemática", que la intensidad del pico de la ettringita formada por cada cemento de mezcla PUZ preparado al efecto, véase Gráfico nº 1 y Fig. 10, sea la resultante de la suma de la intensidad de pico proporcional correspondiente a sus fracciones componentes respectivas al estado puro ó solas, véase Gráfico nº 1 y Fig. 10, lo cual no es óbice para comprender que lógicamente la misma, en cada instante del ensayo, ha de resultar ser siempre la suma de las originadas por tales componentes respectivos, habiendo de ser además tanto menos diferenciables, cuali y semicuantitativamente, entre sí, cuanto más  $C_3A$  tuviere el cemento matriz acompañante correspondiente, y viceversa, como es el caso que nos ocupa del cemento matriz acompañante PY-6.

11ª y 12ª.- Véanse las Deducciones X, 14ª y 15ª.

13ª y 14ª.- Véanse, los párrafos finales de las Deducciones X, 2ª y 8ª, respectivamente.

15ª.- Véase la Deducción X, 27ª.

16ª.- Según la Conclusión 7ª y afines, cabe preguntarse que al ser ambas ettringitas, la ett-rf y la ett-lf, en cuantía, velocidad de formación y orígenes distintos -la una de la  $Al_2O_3^{r-}$  de una puzolana, y la otra del  $C_3A$  de un cemento portland- y al llevar implícita su génesis un proceso competitivo de fijación de  $SO_3$  y disruptivos diversos por formación al unísono de ettringitas de distinto origen más o menos expansivas en el mismo seno selenitoso apropiado, como puede ser el de una pasta, mortero u hormigón tradicionales de cemento de mezcla PA ó PUZ industrial atacado por aguas selenitosas, cabe preguntarse: ¿Cómo podrán ser sus efectos expansivos ...? ¿En qué se traducirán finalmente...?,

- a) ¿En una ADICION, SINERGISMO, ANTAGONISMO ó INVERSION DE LA ACCION disruptiva de ambas? y por tanto,
- b) ¿Cómo se comportarán frente al ataque de los iones sulfato los cementos PA, PUZ, (en especial de cemento portland matriz PY) citados?.

#### VII.4.3.- Comentario Final

Como se puede observar, esta última conclusión, junto con lo expuesto al final de la,

- 6ª anterior, referente a la ausencia de un método analítico que determine con exactitud el contenido de  $Al_2O_3^{r-}$ ,  $SiO_2^{r-}$  y  $Fe_2O_3^{r-}$ , en especial el  $Al_2O_3^{r-}$  y la - VI.1.2.1.2 (c), 4ª,

justifican y dan pie a la necesidad de la puesta en práctica de la Parte Operativa Fundamental, POF, de este trabajo, al objeto de tratar de obtener al menos un ensayo tecnológico APROPIADO (sencillo, ágil, rápido, fiable y económico) -mediante mezclas-conglomerantes selenitosas adecuadas-, para la caracterización y calificación del tipo y grado de idoneidad de una Puzolana dada para cada caso concreto, y poder decir, al menos aquello de "POR SUS HECHOS... -COMPORTAMIENTO-, LAS CONOCEREIS", ya que habrá de ser éste y no aquél, el que con mayor precisión determine la utilidad, ó no, de dicha puzolana para cada objetivo concreto, (véase la Deducción X, 10ª.2).

1 \* 18,35 g P-1 x 3,5% SO<sub>3</sub> P-1 = 0,64225 g SO<sub>3</sub> del cemento P-1  
 1,66g yeso = 0,77 g SO<sub>3</sub> del yeso agresivo  
 1,41225 g SO<sub>3</sub> = 1,41 g, promedio de SO<sub>3</sub> que hay inicialmente en la mezcla-conglomerante P-1 + Yeso con 7,0% SO<sub>3</sub>.

2 \* 18,51 g P-31 x 3,36% SO<sub>3</sub> P-31 = 0,7145 g SO<sub>3</sub> del cemento P-31  
 1,49 g yeso = 0,69 g SO<sub>3</sub> del yeso agresivo  
 1,4045 g SO<sub>3</sub> = 1,41 g, promedio SO<sub>3</sub> que hay inicialmente en la mezcla-conglomerante P-31 + Yeso con 7,0% SO<sub>3</sub>.

3 \* 17,86 g PY-6 x 2,34% SO<sub>3</sub> PY-6 = 0,417924 g SO<sub>3</sub> del cemento PY-6  
 2,14 g yeso = 1,00 g SO<sub>3</sub> del yeso agresivo  
 1,417924 g SO<sub>3</sub> = 1,42 g, promedio SO<sub>3</sub> que hay inicialmente en la mezcla-conglomerante PY-6 + Yeso con 7,0% SO<sub>3</sub>.

4 \* 11,74 g P-1 x 3,5% SO<sub>3</sub> P-1 = 0,4109 g SO<sub>3</sub> del cemento P-1  
 8,26 g yeso = 3,84 g SO<sub>3</sub> del yeso agresivo  
 4,2509 g SO<sub>3</sub> = 4,25 g, promedio SO<sub>3</sub> que hay inicialmente en la mezcla-conglomerante P-1 + Yeso con 21,0% SO<sub>3</sub>.

5 \* 11,84 g P-31 x 3,26 SO<sub>3</sub> P-31 = 0,457 g SO<sub>3</sub> del cemento P-31  
 8,16 g yeso = 3,79 g SO<sub>3</sub> del yeso agresivo  
 4,247 g SO<sub>3</sub> = 4,25 g, promedio SO<sub>3</sub> que hay inicialmente en la mezcla-conglomerante P-31 + Yeso con 21,0% SO<sub>3</sub>.

6 \* 11,43 g PY-6 x 2,34% SO<sub>3</sub> PY-6 = 0,267462 g SO<sub>3</sub> del cemento PY-6  
 8,57 g yeso = 3,99 g SO<sub>3</sub> del yeso agresivo  
 4,257462 g SO<sub>3</sub> = 4,25 g, promedio SO<sub>3</sub> que hay inicialmente en la mezcla-conglomerante PY-6 + Yeso con 21,0% SO<sub>3</sub>.

7 \* moles Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>+</sup> de lapuzolana M sola con Ca(OH)<sub>2</sub> y 7,0% SO<sub>3</sub> ..... 4,9x10<sup>-4</sup>  
 " " " " M " " " y 21,0% " ..... 3,2x10<sup>-4</sup>  
 " " " " M en cemento mezcla PY-6/M 70/30 con 7,0% de SO<sub>3</sub> ..... 5,4x10<sup>-4</sup>  
 " " " " M en cemento mezcla PY-6/M 70/30 con 21,0% de SO<sub>3</sub> ..... 3,5x10<sup>-4</sup>  
 " C<sub>3</sub>A del cemento P-1 con 7,0% de SO<sub>3</sub> ..... 95,8x10<sup>-4</sup>  
 " " " " P-1 " 21,0% de SO<sub>3</sub> ..... 61,3x10<sup>-4</sup>  
 " " " " P-31 " 7,0% de SO<sub>3</sub> ..... 52,2x10<sup>-4</sup>  
 " " " " P-31 " 21,0% de SO<sub>3</sub> ..... 33,4x10<sup>-4</sup>  
 " " " " PY-6 " 7,0% de SO<sub>3</sub> ..... 6,6x10<sup>-4</sup>  
 " " " " PY-6 " 21,0% de SO<sub>3</sub> ..... 4,2x10<sup>-4</sup>

8 \* 6 topoquímico con 6 sin disolución previa.

VIII.- PARTE OPERATORIA FUNDAMENTAL



#### VIII.- PARTE OPERATORIA FUNDAMENTAL

El Planteamiento y Desarrollo General de la Parte Operatoria Fundamental POF, de este trabajo, se ha realizado del siguiente modo:

Basándose en los Objetivos y Fundamentos de este trabajo, así como también en las conclusiones parciales de la POP y mas concretamente en el cuestionamiento realizado en la última de las mismas, VII.4.2, 16ª, referente a la posible acción aditiva, sinérgica, antagónica o inversa, existente entre la ett-rf, o de origen  $Al_2O_3^{r-}$  de una Puzolana, y la ett-lf, o de origen  $C_3A$  de un Cemento Portland, al encontrarse ambos materiales juntos, y únicamente, en un cemento de mezcla, PA ó PUZ, en forma de pasta o mortero, se trató de manifestar, exponer y precisar, dicho tipo de acción, en cada caso, mediante la puesta en práctica y realización de las mezclas hidráulicas correspondientes a los métodos acelerados de ensayo ya citados de L-A, ASTM C 452-68, ASTM C 452-75 é HIBRIDO-1, respectivamente, ensayos, todos ellos, que han conformado esta POF. Así pues y en consecuencia se ha operado de la siguiente manera:

- 1ª.- Seleccionados y elegidos razonadamente, como se vió en su momento, doce cementos portland, seis P y seis PY, véase Tabla 11, con los 6P, y 4PY, el PY-5, el PY-1, el PY-4 y el PY-6 respectivamente y con cada puzolana "referencial" "silícica", D, y "aluminica", M, se prepararon las mezclas porcentuales, en peso, 80/20, 70/30 y 60/40 respectivamente, mínimas necesarias para el fin propuesto.
- 2ª.- Con los cementos portland, P-1, P-2 y P-31, y los cementos portland resistentes al ataque de los iones sulfato PY-4 y PY-6, y con cada puzolana natural española O, A y C, se prepararon sendas mezclas porcentuales, en peso, 80/20 y/o 70/30 y/o 60/40 respectivamente, según objetivos.
- 3ª.- Dado que la puzolana "referencial" "silícica", D, elegida en un principio recayó en una diatomea, que por razones obvias, tenía que ser muy pura, (purificada y calcinada) e "ideal" para los fines de este trabajo, y puesto que generalmente en la naturaleza no suele presentarse en tan elevado grado de pureza, sino mas bien con restos mas o menos arcillosos, margosos, calcáreos, etc., que la impurifican en mayor o menor cuantía, véase apartado VII. 1, en detrimento de su contenido de sílice y en favor de la alúmina, aportada general y principalmente por tales impurezas presentes -con sus posibles, ó no, consecuencias ulteriores de formación de sulfatoaluminatos de calcio hidratados-, es por lo que se eligió además una segunda tierra de diatomeas "Natural" o Kieselgur ó Pseudokieselgur, nacional, que al ser mas impura que la D, resultó

tener lógicamente menor contenido de sílice y mayor de alúmina que ésta, ver Tabla 11.

Pues bien, con esta segunda tierra de diatomeas, N, y los cementos portland P-1, P-2, P-31, P-5 y portland resistentes al ataque de los iones sulfato PY-1, PY-4 y PY-6, se prepararon igualmente mediante túbula (tiempo común de mezclado 30 minutos), sendas mezclas porcentuales, en peso, 30/20 y/o 70/30 y/o 60/40 respectivamente, según objetivos.

- 4º.- Por las reservas aludidas en el Cap.III, pag.25 y en el Cap.IV, pag.103, y por los fundamentos técnicos 1º, 2º y 3º, se prepararon, mezclándolos igualmente mediante túbula el cemento portland P-31 y las puzolanas CV-10 ó CV-19, sendas mezclas respectivas porcentuales en peso, P-31/CV-10 70/30 y P-31/CV-19 70/30, única y exclusivamente.

Y aquí cabe citar al respecto que al tener el cemento portland matriz P-31 un 7,62% de  $C_3A$ , véase Tabla 11, se puede calificar, según la norma ASTM C 150 (6) como "de moderada resistencia al ataque del sulfato", pretendiéndose en este trabajo que mediante ambas puzolanas, la primera, CV-10, aumentara y la segunda, CV-19, disminuyera, al menos, el valor del  $40,1-28d$  y/o  $41,7-28d$  del cemento matriz citado, P-31, por la contada menor nocividad, a corto plazo (la propia vida del proyectista) de los sulfato ferritos de calcio hidratados  $\bar{S}FCH$ , de origen puzolana, que intencionadamente se deseaban originar como "causa protectora" en lugar de parte de los sulfatoaluminatos correspondientes,  $\bar{S}ACH$ , de origen  $C_3A$ , del cemento portland P-31 matriz.

- 5º.- Los métodos acelerados de ensayo L-A, ASTM C 452-68, ASTM C 452-75 C HIERICO-1, se aplicaron, según objetivos y/o fundamentos en cada caso, a los distintos cementos elegidos y/o preparados para este trabajo, con el siguiente orden:

5º.1.- El método acelerado de ensayo L-A se aplicó:

- a todos los cementos P y PY matrices elegidos
- a todos los cementos PA y/o PUZ preparados según objetivos y/o fundamentos
- a todos los cementos PUZ industriales elegidos para este trabajo (ocho)

5º.2.- Las dos versiones del método acelerado de ensayo ASTM C 452, o sea, la ASTM C 452-68 (215) y la ASTM C 452-75 (239) se aplicaron a los cementos PA y PUZ preparados, según objetivos y/o fundamentos, con cada una de las puzolanas siguientes: D,N,M, CV-10 y CV-19.

Como consecuencia de los resultados que se obtuviesen y puesto

que el agua de amasado de cada versión, método acelerado de ensayo en cuestión, iba a ser diferente para cada cemento PA y PUZ así ensayados, se podría sacar como deducción, cuál de las dos aguas de amasado empleadas en cada uno de ellos, ejercería mayor acción "enmascarante" ó "protectora" nel mismo (por proporcionar a igualdad de edad y cemento de mezcla, menor  $\bar{\Delta L}$ ), ante el ataque de los iones sulfato, para de este modo y por reducción a la inversa elegir la contraria, es decir aquella que a igualdad de edad del ensayo proporcionará mayor  $\bar{\Delta L}$ , para aplicarla al resto de los cementos, ya 6P, P y PY, ya de mezcla PA, PUZ y PUZ preparados o elegidos para este trabajo; puesto que cualquier método acelerado de ensayo, en el supuesto de que determinare el grado de resistencia potencial de cualquier cemento al ataque de los iones sulfato -o lo que es lo mismo, si es o no de elevada resistencia química al citado ataque selenitoso en dicho (s) medio (s) tan concreto (s)-, valiéndose para ello de un  $\bar{\Delta L}$  "apuntador" ó "indicador" y no total ni definitivo, es conveniente, en aras de una mayor seguridad proyectiva, que el mismo quede lo menos "enmascarado" posible o sea lo más "al descubierto" posible, para lo cual se deberá de elegir, como se ha dicho anteriormente, aquella agua de amasado que mayor  $\bar{\Delta L}$  proporcione a igualdad de edad del ensayo.

6ª.- El método acelerado de ensayo HIERIDO-1, se aplicó fundamentalmente y en primer lugar, a todos y cada uno de los 2 cementos 6P y 6PY elegidos para la realización de este trabajo. Y ello por las siguientes razones:

- a) porque dada la gran variabilidad existente de tipologías de cementos normalizados, bastante limitado resultaría también este método H-1, como los correspondientes ASTM C 452-68 y ASTM C 452-75, si a diferencia de ellos, única y exclusivamente fuera aplicable, en este caso, a los cementos de mezcla PA y PUZ y no a sus correspondientes P ó PY solos, ó matrices, con que se prepararon los mismos,
- b) porque al surgir este método, en parte, "a imagen y semejanza" de uno de sus progenitores, en este caso el ASTM C 452-68, primeramente se habrían de comparar "sus respuestas" con las proporcionadas por éste que como se sabe es aplicable única y exclusivamente a los cementos P y PY,
- c) porque confirmada la posibilidad de aplicación de este método a los citados cementos P y PY, antes de pasar a su uso 'generalizado, habría de pasar por la fase del estudio de su distinto grado de reproducibilidad y repetibilidad la cual

se sale fuera de los ámbitos de este trabajo de tesis,  
d) por las múltiples y distintas razones afines expuestas a lo largo  
de este trabajo.

A continuación véase la parte final del apartado VIII.3.1 (venidero).

7º.- La evolución de las características organolépticas de algunas probetas  
de determinados cementos se constató mediante la realización de las  
Fotografías correspondientes a las edades oportunas.

8º.- Paralelamente a los últimos ensayos 5º.2 y 6º, y con los materiales  
utilizados en los mismos, se prepararon las correspondientes probetas  
de 1x1x6 cm (probetas tipo "Koch y Steinegger), para tras conservarlas  
convenientemente en agua desionizada, por las razones apuntadas en  
el apartado, ir las metiendo una a una (seis por edad principal, 1, 14, 28,  
60, 90, 180, 365, 730 días y tres por edad secundaria 7, 21, 120, 150,  
270 y 545 días) al ensayo de flexotracción y sus mitadas respectivas  
seguidamente al ensayo de compresión (diez mitadas, "hermanas" dos a  
dos, por edad principal, y cuatro mitadas, "hermanas" dos a dos, por  
edad secundaria) y porosidad (dos mitadas "hermanas" por edad principal y -  
secundaria).

9º.- Del mismo modo se prepararon, por cemento ensayado, dos probetas tipo  
ASTM C 452, pero sin índices de acero inoxidable, para medir a las  
edades citadas y a título orientativo, indicativo y jamás decisivo  
ni definitivo, el parámetro Velocidad de Ultrasonido, Vu.

VIII.1.- Estudio del Comportamiento Frente al Ataque de los Iones Sulfato de -  
los Cementos P, PY, PA, PUZ y PUZ seleccionados, Elegidos y/o Prepara-  
dos para este Trabajo, mediante el Método Acelerado de Ensayo -  
Le Chatelier-Anstett (L-A)

VIII.1.1.- Técnica Operatoria

Se ha seguido la técnica operatoria descrita por L. Blondiau (199). No obstante y de forma muy resumida se puede decir que este método acelerado de ensayo, tiene por objeto determinar el hinchamiento de una probeta cilíndrica llamada comúnmente "torta", de 80 mm. de diámetro ( $\phi_0$ ) y 30 mm de altura ( $h_0$ ), confeccionada comprimiendo a 20 Kp/cm<sup>2</sup>, durante 1 minuto, una mezcla íntima de dos partes, en peso, de cemento a ensayar parcialmente hidratado, y una parte, en peso, de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (del 95,58% de riqueza en este caso).

Por otra parte y antes de continuar adelante se ha de hacer constar:

- 1º.- Que dada la GRAN AGRESIVIDAD (y no poco rechazo por ello) , de este método de ensayo L-A, el mismo sólo se ha utilizado como "referencial" ó "de patronazgo", para mediante él poder refrendar ó no, los resultados obtenidos en los otros dos métodos de ensayo también utilizados en este trabajo, el ASTM C 452 y el H-1.
- 2º.- Que no obstante lo anterior, se ha tratado, en lo posible, de estudiar e investigar cada caso concreto, al objeto de poder interpretar y justificar las causas reales de los resultados por él proporcionados y consecuencias de los mismos. Para ello, y en cada caso, se han utilizado aquellos resultados y conclusiones anteriores obtenidas, del A.Q. ver Tabla II , y/o del ensayo de Fratini, ver Fig.4 y Tabla 13, y/o de la PCP , ver Tablas 15 y 16 que se creyeron necesarios para tal fin.
- 3º.- Que todas las tortas preparadas, como indica el método L-A, con la puzolana D, fuera cual fuese el cemento P ó PY que le acompañase en cada caso, tenían, nada más preparadas, un diámetro inicial,  $\phi_0$ , de 80 cm, y una altura inicial,  $h_0$ , de 30 cm, para TODAS las mezclas 80/20; por el contrario el resto de las tortas "hermanas" subsiguientes realizadas, esto es, la 70/30 y 60/40 no mostraron igual altura inicial,  $h_0$ , de 30 cm (y si sólo el diámetro inicial,  $\phi_0$ , de 80 cm), siendo la misma gradativamente superior en dicho orden, es decir,  
 $30 \text{ cm} = h_0 \text{ 80/20} < h_0 \text{ 70/30} < h_0 \text{ 60/40}$

En definitiva que la altura inicial,  $h_0$ , de la torta se vió aumentada en el momento de haberla preparado y pese a haberle aplicado como al resto de ellas una presión de compactación de  $20 \text{ Kp/cm}^2$  durante 1 minuto, según prescribe el método en cuestión, en proporción directa a la puzolana D presente añadida, Fotografías 1, 2, 3 y 4.

Probablemente ello pueda deberse a que al estar constituida dicha puzolana D por caparazones huecos, o mejor, estuches vítreos, inicialmente vacíos y huecos, a más puzolana, D, añadida, más "huecos" tendrá la torta correspondiente, los cuales, actuando de "muelle" más podrían amortiguar en cierto sentido la presión de compactación citada, impidiendo de este modo, la compactación normal del sistema ó torta correspondiente.

De esta manera la altura inicial de cada torta se haría mayor conforme mayor efecto "muelle" se pudiera producir, es decir, conforme mayor cantidad de puzolana, D, tenga la misma, habiendo de ser por ello la mezcla 60/40 la que mayor altura inicial alcanzare, como así ocurriera en la realidad, que es lo que se viene a manifestar.

Con el diámetro no podría ocurrir otro tanto por la pared fija correspondiente del molde cilíndrico, de aquí que todos los diámetros, de origen, hayan resultado ser siempre iguales, independientemente del contenido de puzolana D de cada torta.

4º.- Que tanto para este método de ensayo de L-A como para los anteriores de Fratini, apartado VI.1.2.1.2.1º (C), y POP, apartado VII, o posteriores, ASTM C 452, apartado VIII.2.e H-1, apartado VIII.3:

4º.1.- Las puzolanas que lo necesitaron, fueron molidas hasta dejar una cantidad de retenido máxima del  $20\% \pm 1\%$ , sobre el tamiz de  $45 \mu\text{m}$  de luz de malla y

4º.2.- Cada una de las puzolanas elegidas para cada ensayo anterior y antes de someterla(s) al mismo se mezcló con su cemento portland matriz acompañante respectivo conforme se ha indicado expresamente en el apartado VII.1.2º, final.

Y por último se ha de decir que el  $\emptyset$  de las tortas a cada edad del ensayo se midió con un calibre ó pié de rey, mientras que la "Penetración de la Aguja de Vicat", PAV (mm), se midió con una aguja de Vicat (1) tal como especifica expresamente el Pliego RC-75.

VIII.1.2. Resultados Experimentales Obtenidos

VIII.1.2.1.- De los doce Cementos Portland, 6 P y 6 PY, solos : Discu-  
sión e interpretación, véase Tablas 17 y 27.

Discusión VIII.1.2.1.

(E) y (F) Parámetros:  $\Delta\emptyset$ ,  $Vc\emptyset$  y PAV.

- 1ª.- En todas las tortas de los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, ensayados, la evolución y desarrollo de los valores del  $\Delta\emptyset$ ,  $Vc\emptyset$  y PAV correspondientes, ha sido el de aumento, disminución y aumento, respectivamente, a lo largo del tiempo del ensayo, siendo,
  - el primero,  $\emptyset$ , tanto mayor,
  - el segundo,  $Vc\emptyset$ , tanto mayor, y
  - el tercero, PAV, tanto mayor,cuando mayor ha sido el contenido de  $C_3A$  del cemento ensayado. No obstante, lo realmente interesante del parámetro  $Vc\emptyset$  es que sea cual fuere el cemento P o PY ensayado, el mayor valor tanto absoluto como relativo del mismo transcurre por lo general durante los primeros 28 días de edad de las probetas respectivas.
- 2ª.- Las clasificaciones obtenidas, a igualdad de edad fundamental del ensayo, de los 12 cementos, 6P y 6PY, ensayados, en función del  $\Delta\emptyset$  y PAV de su torta correspondiente de menor a mayor por este orden, a las edades fundamentales del ensayo de 1, 28, 90, 365 y 730 días, han sido las siguientes, véase Tabla 27, las cuales han resultado ser tanto más coincidentes cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, y viceversa, en cuyo caso la coincidencia ha sido superior, como se verá, mediante el método ASTM C 452-68 que mediante éste.

Pues bien, teniendo en cuenta que cada  $\Delta\emptyset$  es un índice del grado de resistencia potencial al ataque de los iones sulfato, ó RS, del cemento correspondiente ensayado, tales clasificaciones son fiel reflejo de las que se obtendrían en función del mismo.
- 3ª.- Por lo general, en todas y cada una de las tortas de los 12 cementos portland, 6 P y 6 PY ensayados, la diferencia,
  - de  $\Delta\emptyset$  entre la edad final e inicial ó cualquier otra intermedia del ensayo,
  - de  $Vc\emptyset$  entre la edad inicial y final del ensayo,aumenta el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado.
- 4ª.- Se ha de destacar por lo paradójico que :
  - 1.- Los cementos PY-4 y PY-6, ambos con contenidos respectivos de
    - a)  $C_3A$ , nulo, según el cálculo de Bogue,
    - b)  $C_3S$  (58,19% y 79,43% respectivamente), y
    - c)  $C_2S$  (19,46% y 2,29% respectivamente).

TABLA 17

CDAO (mm)	CEMENTOS P										CEMENTOS PY	PY-1	PY-2	PY-3	PY-4	PY-5
	P-1	P-2	P-4	P-32	P-51	P-5	P-1	P-2	P-4	P-32						
EDAD (mes)	A 1 (%)	A 2 (%)	A 3 (%)	A 4 (%)	A 5 (%)	A 6 (%)	A 7 (%)	A 8 (%)	A 9 (%)	A 10 (%)	A 1 (%)	A 2 (%)	A 3 (%)	A 4 (%)	A 5 (%)	A 6 (%)
1	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
7	4,21	4,21	4,21	4,21	4,21	4,21	4,21	4,21	4,21	4,21	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
14																
21																
28	8,21	8,21	8,21	8,21	8,21	8,21	8,21	8,21	8,21	8,21	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
60																
90	14,21	14,21	14,21	14,21	14,21	14,21	14,21	14,21	14,21	14,21	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48	1,48
120																
150																
180	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26
270																
365	25,26	25,26	25,26	25,26	25,26	25,26	25,26	25,26	25,26	25,26	12,21	12,21	12,21	12,21	12,21	12,21
545	42,14	42,14	42,14	42,14	42,14	42,14	42,14	42,14	42,14	42,14	22,12	22,12	22,12	22,12	22,12	22,12
730	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	59,21	30,73	30,73	30,73	30,73	30,73	30,73
1	14,25	14,25	14,25	14,25	14,25	14,25	14,25	14,25	14,25	14,25	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
7	21,20	21,20	21,20	21,20	21,20	21,20	21,20	21,20	21,20	21,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
14																
21																
28	28,40	28,40	28,40	28,40	28,40	28,40	28,40	28,40	28,40	28,40	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
60																
90	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
120																
150																
180	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
270																
365	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
545	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
730	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

TABLA 23

CLASIFICACION DE LAS PUZOLANAS D,N,O,A,C Y M, COMPARADAS ENTRE SI Y RESPECTO DE SU CEMENTO PORTLAND MATRIZ ACOMPAÑANTE RESPECTIVO, P ó PY, SOLO, EN (1Δ0 (%)), DE MENOR A MAYOR VALOR										
		CEMENTO PORTLAND MATRIZ ACOMPAÑANTE RESPECTIVO:								
		P-1(100,00% C <sub>41</sub> )		P-2 (100,00% C <sub>41</sub> )		PY-4 (100,00% C <sub>41</sub> )		PY-5 (100,00% C <sub>41</sub> )		
		MAS PUZOLANA:								
LEAD	MARKET	CEMENTO PORTLAND MATRIZ ACOMPAÑANTE RESPECTIVO:	P-1(100,00% C <sub>41</sub> )		P-2 (100,00% C <sub>41</sub> )		PY-4 (100,00% C <sub>41</sub> )		PY-5 (100,00% C <sub>41</sub> )	
1	1	80/20	D - C - M - O - A*	D - A - O - C - M*	O - D - A - C - M	O - A - C - D - M				
1	1	70/30	D - O - A - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
1	1	60/40	D - O - A - C - M	D - O - A - C - M	O - D - A - C - M	O - A - C - M				
7	7	80/20	D - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	A - O - O - C - M				
7	7	70/30	D - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
7	7	60/40	D - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - A - C - M				
			ELABORACION DE LAS DIVINIDAD PUZOLANAS EN LOS SIGUIENTES TIPOS DE MATRICES:				ELABORACION DE LAS DIVINIDAD PUZOLANAS EN LOS SIGUIENTES TIPOS DE MATRICES:			
			PARAMETRO				PARAMETRO			
			P <sub>1</sub> (100,00%)				P <sub>1</sub> (100,00%)			
			P <sub>2</sub> (100,00%)				P <sub>2</sub> (100,00%)			
			PY <sub>4</sub> (100,00%)				PY <sub>4</sub> (100,00%)			
			PY <sub>5</sub> (100,00%)				PY <sub>5</sub> (100,00%)			
			P <sub>1</sub> (100,00%)				P <sub>1</sub> (100,00%)			
			P <sub>2</sub> (100,00%)				P <sub>2</sub> (100,00%)			
			PY <sub>4</sub> (100,00%)				PY <sub>4</sub> (100,00%)			
			PY <sub>5</sub> (100,00%)				PY <sub>5</sub> (100,00%)			
28	28	80/20	D - C - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
28	28	70/30	D - C - O - A - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
28	28	60/40	D - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
90	90	80/20	D - C - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
90	90	70/30	D - C - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
90	90	60/40	D - C - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
365	365	80/20	D - C - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
365	365	70/30	D - C - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
365	365	60/40	D - C - A - O - C - M	D - A - O - C - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
730	730	80/20	D - C - M - O - A - C	D - A - C - M - A - O	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
730	730	70/30	D - C - M - A - O - A	D - A - C - M - A - O	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
730	730	60/40	D - C - O - A - M	D - A - C - O - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
730	730	60/40	D - C - O - A - M	D - A - C - O - M	O - D - A - C - M	O - D - A - C - M				
NOTAS Y Y Z DE LA TABLA										
1 - VERSE LAS NOTAS Y Y Z DE LA TABLA										
2 - O - D - A - C - M - O - A - C - M -										



mostraron unos  $\Delta\emptyset$  diferentes a lo largo de todo el ensayo, siendo siempre mayor el del PY-6; aunque no obstante y en ambos casos menores del valor 1,25% a la edad de 28 días.

2.- El cemento PY-6 alcanzó :

- a) hasta los 365 días de edad, unos  $\Delta\emptyset$  mayores que los correspondientes a los cementos PY-1, PY-2 y PY-3, pese a tener éstos un mayor contenido de  $C_3A$ , 3,83%, 1,23% y 0,79% respectivamente, que aquél.
- b) desde los 365 días de edad hasta final del ensayo, unos  $\Delta\emptyset$  menores que los correspondientes a los cementos antes citados.

Por último y volviendo de nuevo al parámetro derivado  $Vc\emptyset$ , que disminuye más o menos sinuosamente (aunque por lo general más bien menos que más) con el transcurso del ensayo hasta alcanzar prácticamente su nulidad, se ha de destacar sobre el mismo que, sea cual fuere el cemento portland P ó PY ensayado, el valor máximo, absoluto y relativo de la  $Vc\emptyset$  de su torta correspondiente, se alcanza, por lo general, en los primeros 28 días del ensayo, y más concretamente en los primeros 7 días del mismo, siendo ambos valores, absoluto y relativo de la  $Vc\emptyset$ , tanto mayores cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland constitutivo de la torta y viceversa.

Interpretación VIII.1.2.1. (E) y (F)

Si el  $\Delta\emptyset$  de la torta de cada uno de los doce cementos portland, 6P y 6PY, ensayados (L-A), es sinónimo de una expansión habida en su seno, como consecuencia primordial, entre otros, de la ett-lf que se provoca en la misma, (véase reacción de formación de ett-lf a partir de  $C_3A$  en la pag. 42), es obvio, que aquél será tanto mayor cuanto más y mejor se verifique ésta última, es decir, cuanto mayor contenido de  $C_3A$  posea el cemento portland ensayado según la reacción anterior y su confirmación correspondiente en la POP, véase Fig. 10 a). Y merced a que el agresivo, yeso,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , participa en todos los casos, en cantidad necesaria y suficiente e igual para todos ellos, pues en el peor de los mismos, el cemento P-1 con 14,11% de  $C_3A$ , necesitaría un  $\approx 12,54\%$  de  $SO_3$ , o sea, un  $\approx 26,97\%$  de  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  para poder pasar todo su  $C_3A$  a ett-lf, cantidad ésta inferior al 33,33%, puéstoles inicialmente como agresivo común.

De aquí que, sea cual fuere el cemento portland de este tipo así ensayado, podrá originar tanta mayor cantidad de ett-lf expansiva, con sus consecuencias pertinentes (con apreciables diferencias en determinados casos de las que se hablarán más adelante), de

- mayor  $\Delta\emptyset$  y PAV (por aumento lógico de la porosidad originada por la expansión de la ett-lf formada), a igualdad de edad del ensayo y conforme transcurre el mismo, y
- mayor  $Vc\emptyset$  a igualdad de edad inicial del ensayo, y prácticamente nula, en todos los casos, a igualdad de edad intermedia y final del mismo.

cuanto mayor fuere su contenido de  $C_3A$ , y viceversa, como así ha ocurrido con aproximación cierta en este método de ensayo L-A, pero menor como se verá en igual caso del método ASTM C 452-68.

Y el que la coincidencia de clasificaciones haya sido en este caso menor, sobre todo en el caso de los cementos portland de mediano y elevado contenido de  $C_3A$ , y a las edades finales del ensayo, pese a que en teoría debiera haber ocurrido lo contrario, viene a dar a entender que la expansividad de la  $ett-lf$  <sup>2<sup>da</sup></sup> en cada caso debe de ser tanto mas anti-endurecedora ó reblandecedora de la torta cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland constitutivo de la misma, y viceversa -véanse los valores del PAV respectivos, en cuyas correspondientes clasificaciones derivadas de los mismos están bastante opuestamente cambiados de lugar, véase la Tabla 27. Con lo cual las consecuencias derivadas de la innata expansividad de aquella, aumento del valor de su  $\Delta\theta$ , se "acomodaría" mejor, y su  $\beta$  correspondiente sería menos variable, en valor absoluto, en el tiempo,

- en el primer caso, elevado contenido de  $C_3A$ , que

- en el segundo caso, mediano contenido de  $C_3A$ ,

en cuyo último caso deberia ocurrir todo lo contrario, es decir, mayor expansión que efecto reblandecedor de la torta, como así ha ocurrido lógicamente en este trabajo entre el cemento portland P-5 y el P-1 ó el P-2.

No obstante, teniendo en cuenta que a las edades iniciales del ensayo de 1 a 28 días (e incluso 90 días en este trabajo), no ha ocurrido lo anterior sino en gran medida todo lo contrario, o sea, la existencia de un grado bastante aproximado de proporcionalidad directa entre el contenido de  $C_3A$  de cada cemento portland así ensayado y el  $\Delta\theta_{1-28-90 d.} (\%)$  de su torta respectiva, la aseveración de Blondiau referente a que para obtener -según la característica "grado de resistencia sulfática"-, la calificación, cualificación y/o clasificación de varios cementos portland así ensayados se ha(n) de emplear el (los) valor(es) del  $\Delta\theta_{1-28 d.} (\%)$ , de sus tortas respectivas, y no los  $\Delta\theta$  correspondientes a las edades posteriores a la de 90 días, queda así plenamente justificada. Y más aún todavía teniendo en cuenta lo dicho al respecto referente a dicho parámetro,  $Vc\beta$ , al final de la Discusión VIII.1.2.1., anterior.

Por otra parte y en cuanto a que por lo general en todas las tortas, 6P y 6PY, la diferencia de  $\Delta\theta$  y  $Vc\beta$  entre la edad final e inicial e inicial y final, respectivamente, del ensayo, aumente con el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland, probablemente todo ello se debe a que, por lo general, en todas las tortas se deben de producir, entre otras, dos reacciones expansivas, en mayor o menor grado:

a) la de formación de la  $ett-lf$ , (Véase el RV que es de 108,0, en el apartado IV.2.3.3<sup>a</sup>.1) y

b) la de formación de  $CaCO_3$ , por carbonatación de la portlandita del medio, (Véase el RV que es de 1 a 1,08, en el apartado IV.2.4.5<sup>a</sup>.)

lo cual se debe de traducir por tanto, en que minimizadas las consecuencias nocivas de la primera -ocurribles mayoritariamente en las primeras edades del ensayo en todos los cementos, 6P y 6PY, ensayados- por ausencia de alguno de sus reactivos (según la estequiometría anterior por "consumo" total del  $C_3A$  en todos ellos, tanto más pronto cuanto menor fuere su contenido original), podrían quedar patentes las de la segunda si fueran nocivas expansivamente hablando, ya que prácticamente no lo son nada en absoluto. No obstante, conviene también recordar al efecto la posibilidad de de formación de ettringita de muy lenta formación por

ser de origen  $Al^{3+}$  del  $C_4AF$  y sus s.s., la cual y como es sabido se forma muchísimo mas lentamente que la de origen  $C_3A$ , y por tanto mostraría sus efectos expansivos y nocividad correspondiente a las edades finales del ensayo solapándose para entonces con la derivada de la carbonatación de la portlandita residual,

Así ocurriría que tal tipo de ettringita de origen  $Al^{3+}$  del  $C_4AF$  hará que

- a igualdad de edad intermedia y/o final del ensayo e igualdad de contenido prácticamente nulo de  $C_3A$ , el  $\Delta\emptyset$  deberá aumentar con la cantidad de portlandita presente y ésta a su vez con la cantidad de su agente causal, en este caso  $C_3S$  principalmente, que la pueda originar al hidratarse; por lo tanto a mas  $C_3S$  tenga el cemento PY ensayado, mayor  $\Delta\emptyset$  y PAV (por idéntico motivo anterior, aumento de porosidad de la torta), se deberán originar a tales edades finales del ensayo (mientras el que la  $Vc\emptyset$  continúe siendo baja respecto a la inicial, indica que la  $Vf$  del  $CaCO_3$  anterior de origen portlandita debe ser inferior a la  $Vf$  de la ett-lf), como así ha ocurrido en este trabajo entre los cementos PY-4 y PY-6, y
- a desigualdad de contenido de  $C_3A$ , pero éste siendo siempre bajo ó prácticamente nulo y por lo tanto menor del 5%, y desigualdad de  $C_3S$ , el  $\Delta\emptyset$  y PAV deberán aumentar en función de tales reacciones anteriores ocurridas en paralelo, cuyas manifestaciones externas y consecuencias pertinentes se podrán primar, o sea alternar en primacía, según la cuantía de sus reaccionantes respectivos en cada momento del ensayo, pero siempre y en este caso dentro de los límites citados al principio, como así ha ocurrido también en este trabajo entre el grupo de los 6 cementos PY ensayados.

Finalmente y respecto a las dos reacciones expansivas antes citadas, la de formación de ett-lf ó de origen  $C_3A$ , y la de formación de  $CaCO_3$  de origen portlandita, cabe decir que a tenor de los resultados experimentales obtenidos y hasta la edad de duración del ensayo de 730 días, parece ser que la posibilidad de que se haya podido formar una notable cantidad de ett-lf de origen  $C_4AF$  (a decir de los investigadores mucho mas lenta de formarse que la de origen  $C_3A$ ), es bastante escasa, ya que según los resultados experimentales obtenidos de la POP, ver Fig. 10 d), la altura de pico de la ett-lf del cemento PY-6 con 21.0% de  $SO_3$  (PY-6) correspondiente a las edades intermedia y tardía de 180 y 730 días respectivamente de hidratación selenitosa, habría de ser de igual o parecida magnitud,

que la del cemento (P-1) y/o (P-31), hidratados en idénticas condiciones que aquél, es decir con 21,0% de  $\text{SO}_3$ , hecho éste que como se vé en dicha Fig. 10 d) no se ha llegado a producir, lo cual confirmaría la imposibilidad anteriormente citada hasta la edad final del ensayo de 730 días. No obstante no se ha de olvidar tampoco que en presencia del  $\text{CO}_2$  del aire la ett-1f pasaría a thaumasita (en los Fratinis selenitosos no existe  $\text{CO}_2$ ), y en tal caso si se podría consumir la reacción de formación de ett-1f de origen  $\text{C}_4\text{AF}$  en contra de la hipótesis anterior, pero ya para entonces muy tardíamente y con posterioridad a la edad de 730 días como así ha sido el caso, doy fé. Y la prueba de ello estriba en que el hecho común acaecido del aumento del  $\Delta\theta$  y PAV de la torta correspondiente a cada cemento PY a partir de la edad de 180 días en adelante y tanto mas tarde de dicha edad de 180 días, cuanto menor ha sido el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento PY y viceversa - coincide

- con el hecho común en todos ellos, los 6 PY, de que poseen los mayores valores de  $\text{C}_4\text{AF}$  de los 12 cementos ensayados, 6 P y 6 PY, véase la Tabla 1, y
- no común en los mismos, de  $\text{C}_3\text{S}$ , ya que este contenido no resulta ser siempre mayor en los 6 PY que en los 6 P a diferencia de lo que ocurre con el  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Ello viene a demostrar, por tanto, que el aumento del  $\Delta\theta$  y PAV de las tortas de cada cemento PY, a partir de la edad de 180 días en adelante, parece ser bastante mas adscribible a la ettringita 2<sup>ria</sup> de origen  $\text{Al}^{3+}$  del  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Y dicha ettringita de muy lenta formación o de origen  $\text{Al}^{3+}$  del  $\text{C}_4\text{AF}$  del cemento PY correspondiente, podría quizás llegar a ser preocupante en aquellas obras civiles muy puntuales que por sus especiales características estructurales hayan de reunir a un mismo tiempo

- una elevada o muy elevada incluso, dosificación de cemento PY, 400, 450 ó 500 kg. por metro cúbico de hormigón, según especifica, entre otras, y para tales casos la norma TGL 11357 (142), y
- una "cámara de curado" similar en fundamento a la del ensayo L-A, como bien pudiera ser, entre otros casos, la bóveda de un túnel de trasvase ó conducción de agua situado en terrenos selenitosos en los cuales podría ser aconsejable incluso, la utilización para su ejecución de un cemento portland mas puzolana eminentemente

"silícica", véase los apartados VIII.1.2.2.1, VIII.2.2.2.1, VIII.2.2.2.2 y los correspondientes del VIII.3.3.2, y la Aplicación 13\*.

Por lo tanto y en definitiva de la globalidad de esta interpretación se desprende que desde el punto de vista tecnológico, la edad suficiente para poder calificar (y consiguientemente clasificar), un cemento portland como de elevada resistencia, ó no, al ataque de los iones sulfato en general y de calcio (yeso) en particular, ensayado mediante este método acelerado de ensayo de L-A, puede ser la de 28 días de su torta correspondiente, en lugar de la de 90 días, como habitualmente se venía realizando, dado que a aquella edad prácticamente se habrán producido para entonces en todos los casos, la mayor parte de las reacciones expansivas derivadas de la formación del total de la  $\text{etf-lf}$  a formar, o de origen  $\text{C}_3\text{A}$ , y consiguientemente la mayor parte de la expansión total derivada,  $\text{Vc}\emptyset$ , correspondiente. Ello viene a coincidir con lo establecido a propósito por la versión holandesa del método L-A, norma holandesa NEN 1591 y lo aceptado igualmente por Jaspers (245) en sus trabajos afines. No obstante y excepcionalmente, la edad final del ensayo, podrá prolongarse hasta la de 90 días a lo sumo, en casos de máxima duda. Por el contrario y desde el punto de vista científico mientras que la investigación sobre las tortas de los cementos portland P podría darse por finalizada a tales edades anteriores, la de los portland PY no, prolongándose si fuera necesario durante 3 ó 4 años de acuerdo con las investigaciones de Xalousek y colaboradores (35).

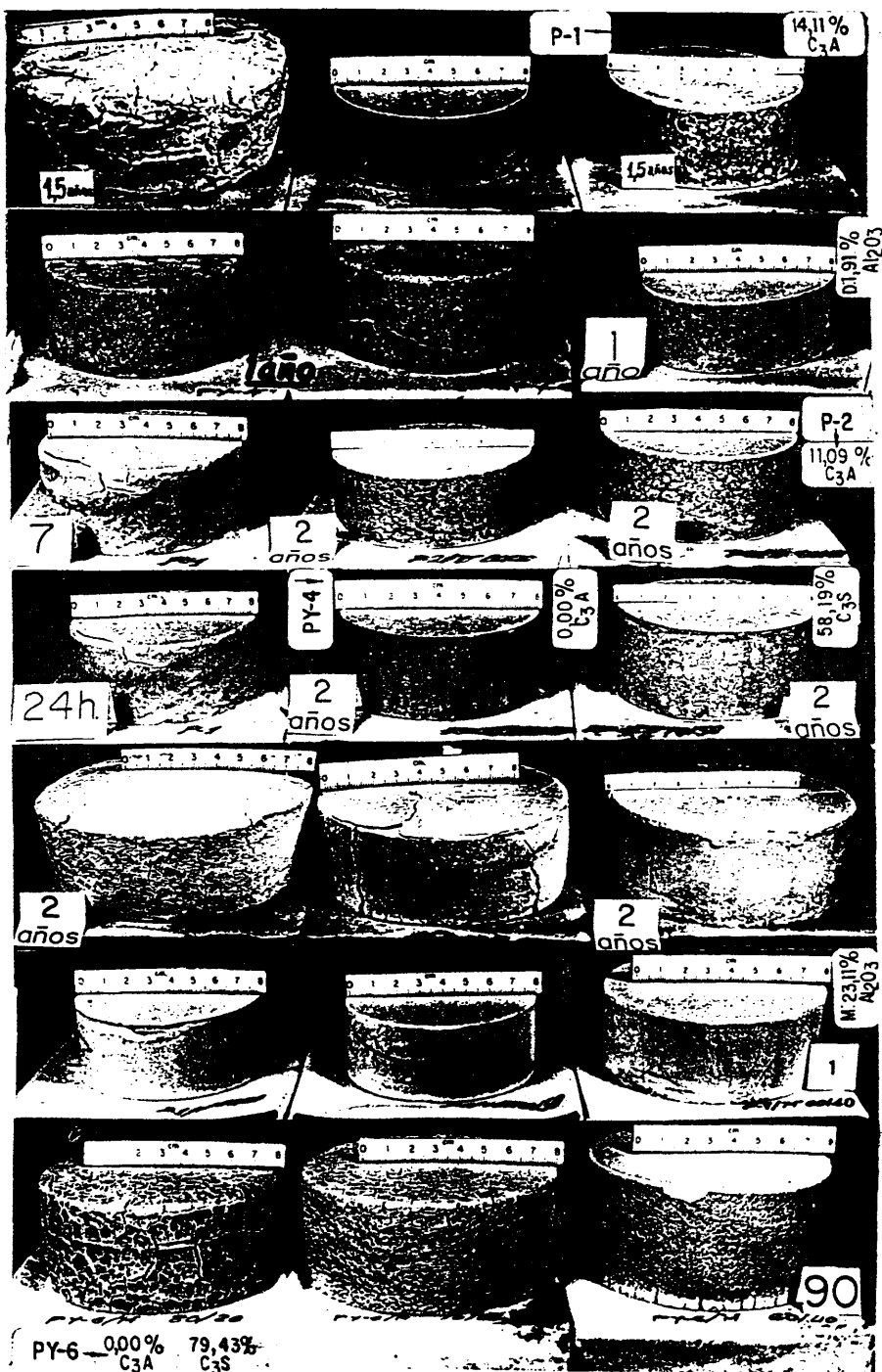
Por otra parte al realizar la representación gráfica de los valores del  $\Delta\emptyset_{28 \text{ días}}$  (en ordenadas) de la torta de cada cemento P y PY ensayado, en función de su contenido porcentual de  $\text{C}_3\text{A}$  (en abscisas) respectiva, y mediante la inter y extrapolación lineal fraccionada correspondiente, se han obtenido los valores del  $\Delta\emptyset$  a la edad de 28 días de las tortas hipotéticas de cada cemento portland teórico, así también ensayado, cuyo contenido porcentual de  $\text{C}_3\text{A}$ , en valores enteros, estaría comprendido entre el valor 0% y el 14%, véase Tabla 18. De donde se deduce el valor del  $\Delta\emptyset_{28 \text{ días}}$  que le deberá corresponder a sendos cementos portland de contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , 8,00% y 5,00%, respectivamente.

Tabla 18  
Le Chatelier- Anstett

Contenido de $C_3A$ (%)	$\Delta \theta$ (%) 28 días
14	9,26
13	8,83
12	8,46
11	7,11
10	6,69
9	5,27
8	4,52
7	3,96
6	2,96
5	1,80
4	1,12
3	0,97
2	0,81
1	0,60
0	0,44

A continuación cabe citar aquí íntegramente el párrafo final de la interpretación VIII.3.3.1, aunque para el caso de este método acelerado de ensayo L-A no es tanta su validez como para el ASTM C 452 e H-1, puesto que en éste, L-A, la primera operación que hay que realizarle al cemento a ensayar, sea cual fuere su superficie específica, es su molienda hasta que pase íntegramente por el tamiz de 88  $\mu$ m de luz de malla, finura ésta que será la condicionante del mismo; por lo tanto y en definitiva cuando el cemento o mejor su clínker correspondiente se ensayen mediante el método de L-A, el grado de finura del (los) mismo(s) habrá de ser tal que pase íntegramente por el tamiz de 88  $\mu$ m de luz de malla.

-----  
\* NOTA.- .... con la obtenida mediante el contenido de  $C_3A$  respectivo.



Fot. 1

VIII.1.2.2.- De los Cementos de Mezcla PA y/o PUZ y PUZ:

VIII.1.2.2.1.- Cementos de Mezcla preparados con la Puzolana Referencial Silfíca D, véase Tablas 19 y 17.

Discusión VIII.1.2.2.1

(E) Parámetros:  $\Delta \emptyset$ ,  $Vc\emptyset$  y PAV.

- 1ª.- En todas las tortas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados al efecto con la puzolana D, la evolución de los valores del  $\Delta \emptyset$ ,  $Vc\emptyset$  y PAV correspondientes, ha sido respectivamente,
- $\Delta \emptyset$ , el aumento ha sido, por lo general, escaso; excepto en la torta P-1/D 80/20 en la que se ha producido resquebrajamiento a la edad de 545 días, Fot.1, empezando además a "levitarse", las zonas mas externas de su base.
  - $Vc\emptyset$ , la disminución ha sido exponencial en todos los casos, de tal modo que en los primeros 28 días y mas aún en las primeras 24 horas ha experimentado un descenso brusco y a continuación suave hasta llegar a ser prácticamente nula a las edades intermedias y finales del ensayo, y a mas final mejor; siendo por tanto destacable el hecho de que sea cual fuere la torta de cemento de mezcla de que se trate, sus mayores valores de  $Vc\emptyset$  alcanzados por la misma, se consiguen durante sus primeros 28 días de edad, y mas aún se podría precisar que dentro de sus primeras 24 horas de edad, habiendo además una disminución ulterior a la edad de 7 días que suele ser bastante mas brusca que la de su cemento portland matriz acompañante respectivo P ó PY solo, y
  - PAV, el valor ha sido nulo -incluso paradójicamente por lo extraordinario, en la torta del cemento P-1/D 80/20, Fots.1,2,3 4, que resultó ser, de entre todas, la mas susceptible a tan severo ataque-, a lo largo de todo el ensayo (véase la pag. 353)

Y todo ello a diferencia o al igual, respectivamente, que le ocurriere a la torta de su cemento portland matriz acompañante respectivo P ó PY solo.

2ª.- Por lo general en las familias de cementos de mezcla citados cuyo cemento portland matriz es un P, se cumple:

- a) hasta la edad de 60 días, que el  $\Delta \emptyset$  de la torta respectiva es directamente proporcional a la cantidad de puzolana D añadida, pero siendo en cualquier caso tales  $\Delta \emptyset$ , bastante



menores que el correspondiente a la torta de su cemento portland matriz correspondiente P anterior solo, cumpliéndose

< $\Delta \emptyset$ <	P-nº/D; 80/20 < 70/30 < 60/40 < 100/CO	h. 60 d.
------------------------	--	----------

ocurriendo, en cierta medida otro tanto con los valores del parámetro  $V_{c\emptyset}$  a la edad de 1 día, excepto para el caso de los cementos de mezcla de cemento portland matriz PY-4 ó PY-6, que les ocurre lo contrario; por lo que en definitiva y según la generalidad anterior, en este caso impera el efecto físico directo (por aumento de poros conforme se aumenta la adición de puzolana D), derivado de la sustitución o suplantación física, de cemento matriz P-nº por puzolana D, sólo que la magnitud de tal diferencia, como se verá, hace que dicho efecto sea algo mas que el derivado de una simple sustitución o suplantación física.

- b) desde la edad de 90 días, que el  $\Delta \emptyset$  de la torta respectiva es inversamente proporcional a la cantidad de puzolana D añadida, pero siendo en cualquier caso tales  $\Delta \emptyset$  bastante menores que el correspondiente a su cemento portland matriz acompañante P anterior solo; de tal modo se tiene que,

> $\Delta \emptyset$ >	P-nº/D ; 100/CO >> 80/20 > 70/30 > 60/40	de 90 a 730 d.
------------------------	--	----------------

ocurriendo en cierta medida otro tanto, con los valores del parámetro  $V_{c\emptyset}$ .

Por el contrario, en el caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente sea un PY exento de  $C_3A$ , esta generalidad anterior 2ª b), se suele cumplir de principio a fin del ensayo para el caso de que el mismo sea un PY-6, y sólo desde la edad de 90 días en adelante para el caso de que el mismo sea el PY-4 aunque hasta dicha edad los  $\Delta \emptyset$  correspondientes a sus tortas PY-4/D 80/20, 70/30 y 60/40, sólo se mantuvieron constantes desde el origen.

Por lo tanto se puede decir que en estos casos, a diferencia del anterior 2ª a), impera el efecto químico inverso de la sustitución física de cemento PY-nº por puzolana D. ,

- 3ª.- A igualdad de edad y cemento de mezcla de cemento portland matriz acompañante P, el  $\Delta \emptyset$  de su torta respectiva ha resultado

ser siempre bastante inferior al que le debería corresponder proporcionalmente, en el supuesto (falso como se verá) de que la puzolana D actuase únicamente como un  $INERTE_{RS}$ , es decir,

S U P U E S T O S :	
TEORICO ( $INERTE_{RS}$ )	REAL
$\Delta \emptyset P-n^2/INERTE_{RS} \ 80/20 = 80\% \Delta \emptyset P-n^2 >$	$\Delta \emptyset P-n^2/D \ 80/20$
$\Delta \emptyset P-n^2/INERTE_{RS} \ 70/30 = 70\% \Delta \emptyset P-n^2 >$	$\Delta \emptyset P-n^2/D \ 70/30$
$\Delta \emptyset P-n^2/INERTE_{RS} \ 60/40 = 60\% \Delta \emptyset P-n^2 >$	$\Delta \emptyset P-n^2/D \ 60/40$

Por el contrario en el caso de que el cemento portland matriz haya sido un PY de contenido nulo de  $C_3A$ , el hecho anterior no se cumple con tanta generalidad, pues para los casos que nos ocupan del cemento portland matriz PY-4 ó PY-6, sólo se cumplió lo anterior,

- en el caso del PY-4, a las últimas edades del ensayo, y
- en el caso del PY-6, a casi todas las edades del ensayo menos las dos primeras.

4ª.- Por lo general desde la edad de 90 días en adelante se cumple que a igualdad de cemento de mezcla, el  $\Delta \emptyset$  y la  $Vc\emptyset$  de su torta respectiva, es directamente proporcional a la cantidad de  $C_3A$  de su cemento portland matriz acompañante respectivo, P ó PY, siendo este hecho mucho mas notorio aún para el parámetro  $Vc\emptyset$  a la edad de 1 día.

5ª.- Pese a las notables ó apreciables diferencias de valores de  $\Delta \emptyset$  obtenidas, a igualdad de edad del ensayo, entre las tortas de los 6 cementos portland P, entre si, y los 6 cementos portland PY, entre si, respectivamente, y mas aún entre ambos grupos, conforme aumenta la diferencia en contenido de  $C_3A$  de los mismos, pues

- a la edad de 28 días, todos los valores de  $\Delta \emptyset$  están comprendidos entre el valor 0,13% de la torta del PY-4, y el valor 9,73% de la torta del P-4, con  $C_3A$  nulo el primero y 10,7% el segundo.
- a la edad de 90 días, entre el valor 0,25% de la torta del PY-4 y el valor 15,46% de la torta del P-4, y

	a <sup>1</sup> nu			a <sup>2</sup> nu			a <sup>3</sup> nu			a <sup>4</sup> nu			a <sup>5</sup> nu			a <sup>6</sup> nu			a <sup>7</sup> nu			a <sup>8</sup> nu			a <sup>9</sup> nu			a <sup>10</sup> nu			a <sup>11</sup> nu			a <sup>12</sup> nu			a <sup>13</sup> nu			a <sup>14</sup> nu			a <sup>15</sup> nu			a <sup>16</sup> nu			a <sup>17</sup> nu			a <sup>18</sup> nu			a <sup>19</sup> nu			a <sup>20</sup> nu			a <sup>21</sup> nu			a <sup>22</sup> nu			a <sup>23</sup> nu			a <sup>24</sup> nu			a <sup>25</sup> nu			a <sup>26</sup> nu			a <sup>27</sup> nu			a <sup>28</sup> nu			a <sup>29</sup> nu			a <sup>30</sup> nu			a <sup>31</sup> nu			a <sup>32</sup> nu			a <sup>33</sup> nu			a <sup>34</sup> nu			a <sup>35</sup> nu			a <sup>36</sup> nu			a <sup>37</sup> nu			a <sup>38</sup> nu			a <sup>39</sup> nu			a <sup>40</sup> nu			a <sup>41</sup> nu			a <sup>42</sup> nu			a <sup>43</sup> nu			a <sup>44</sup> nu			a <sup>45</sup> nu			a <sup>46</sup> nu			a <sup>47</sup> nu			a <sup>48</sup> nu			a <sup>49</sup> nu			a <sup>50</sup> nu			a <sup>51</sup> nu			a <sup>52</sup> nu			a <sup>53</sup> nu			a <sup>54</sup> nu			a <sup>55</sup> nu			a <sup>56</sup> nu			a <sup>57</sup> nu			a <sup>58</sup> nu			a <sup>59</sup> nu			a <sup>60</sup> nu			a <sup>61</sup> nu			a <sup>62</sup> nu			a <sup>63</sup> nu			a <sup>64</sup> nu			a <sup>65</sup> nu			a <sup>66</sup> nu			a <sup>67</sup> nu			a <sup>68</sup> nu			a <sup>69</sup> nu			a <sup>70</sup> nu			a <sup>71</sup> nu			a <sup>72</sup> nu			a <sup>73</sup> nu			a <sup>74</sup> nu			a <sup>75</sup> nu			a <sup>76</sup> nu			a <sup>77</sup> nu			a <sup>78</sup> nu			a <sup>79</sup> nu			a <sup>80</sup> nu			a <sup>81</sup> nu			a <sup>82</sup> nu			a <sup>83</sup> nu			a <sup>84</sup> nu			a <sup>85</sup> nu			a <sup>86</sup> nu			a <sup>87</sup> nu			a <sup>88</sup> nu			a <sup>89</sup> nu			a <sup>90</sup> nu			a <sup>91</sup> nu			a <sup>92</sup> nu			a <sup>93</sup> nu			a <sup>94</sup> nu			a <sup>95</sup> nu			a <sup>96</sup> nu			a <sup>97</sup> nu			a <sup>98</sup> nu			a <sup>99</sup> nu			a <sup>100</sup> nu			a <sup>101</sup> nu			a <sup>102</sup> nu			a <sup>103</sup> nu			a <sup>104</sup> nu			a <sup>105</sup> nu			a <sup>106</sup> nu			a <sup>107</sup> nu			a <sup>108</sup> nu			a <sup>109</sup> nu			a <sup>110</sup> nu			a <sup>111</sup> nu			a <sup>112</sup> nu			a <sup>113</sup> nu			a <sup>114</sup> nu			a <sup>115</sup> nu			a <sup>116</sup> nu			a <sup>117</sup> nu			a <sup>118</sup> nu			a <sup>119</sup> nu			a <sup>120</sup> nu			a <sup>121</sup> nu			a <sup>122</sup> nu			a <sup>123</sup> nu			a <sup>124</sup> nu			a <sup>125</sup> nu			a <sup>126</sup> nu			a <sup>127</sup> nu			a <sup>128</sup> nu			a <sup>129</sup> nu			a <sup>130</sup> nu			a <sup>131</sup> nu			a <sup>132</sup> nu			a <sup>133</sup> nu			a <sup>134</sup> nu			a <sup>135</sup> nu			a <sup>136</sup> nu			a <sup>137</sup> nu			a <sup>138</sup> nu			a <sup>139</sup> nu			a <sup>140</sup> nu			a <sup>141</sup> nu			a <sup>142</sup> nu			a <sup>143</sup> nu			a <sup>144</sup> nu			a <sup>145</sup> nu			a <sup>146</sup> nu			a <sup>147</sup> nu			a <sup>148</sup> nu			a <sup>149</sup> nu			a <sup>150</sup> nu			a <sup>151</sup> nu			a <sup>152</sup> nu			a <sup>153</sup> nu			a <sup>154</sup> nu			a <sup>155</sup> nu			a <sup>156</sup> nu			a <sup>157</sup> nu			a <sup>158</sup> nu			a <sup>159</sup> nu			a <sup>160</sup> nu			a <sup>161</sup> nu			a <sup>162</sup> nu			a <sup>163</sup> nu			a <sup>164</sup> nu			a <sup>165</sup> nu			a <sup>166</sup> nu			a <sup>167</sup> nu			a <sup>168</sup> nu			a <sup>169</sup> nu			a <sup>170</sup> nu			a <sup>171</sup> nu			a <sup>172</sup> nu			a <sup>173</sup> nu			a <sup>174</sup> nu			a <sup>175</sup> nu			a <sup>176</sup> nu			a <sup>177</sup> nu			a <sup>178</sup> nu			a <sup>179</sup> nu			a <sup>180</sup> nu			a <sup>181</sup> nu			a <sup>182</sup> nu			a <sup>183</sup> nu			a <sup>184</sup> nu			a <sup>185</sup> nu			a <sup>186</sup> nu			a <sup>187</sup> nu			a <sup>188</sup> nu			a <sup>189</sup> nu			a <sup>190</sup> nu			a <sup>191</sup> nu			a <sup>192</sup> nu			a <sup>193</sup> nu			a <sup>194</sup> nu			a <sup>195</sup> nu			a <sup>196</sup> nu			a <sup>197</sup> nu			a <sup>198</sup> nu			a <sup>199</sup> nu			a <sup>200</sup> nu			a <sup>201</sup> nu			a <sup>202</sup> nu			a <sup>203</sup> nu			a <sup>204</sup> nu			a <sup>205</sup> nu			a <sup>206</sup> nu			a <sup>207</sup> nu			a <sup>208</sup> nu			a <sup>209</sup> nu			a <sup>210</sup> nu			a <sup>211</sup> nu			a <sup>212</sup> nu			a <sup>213</sup> nu			a <sup>214</sup> nu			a <sup>215</sup> nu			a <sup>216</sup> nu			a <sup>217</sup> nu			a <sup>218</sup> nu			a <sup>219</sup> nu			a <sup>220</sup> nu					
--	-------------------	--	--	-------------------	--	--	-------------------	--	--	-------------------	--	--	-------------------	--	--	-------------------	--	--	-------------------	--	--	-------------------	--	--	-------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	--------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	---------------------	--	--	--	--	--

- 115 -

- a la edad de 730 días, entre el valor 8,02% de la torta del PY-4 y el valor 49,87% de la torta del P-4, en el caso del empleo de esta puzolana silícica D, tales diferencias de  $\Delta\emptyset$ , se minimizan hasta tal punto, que

- a la edad de 28 días, todos los valores de  $\Delta\emptyset$  están comprendidos entre el valor 0,25% de la torta del PY-4/D 70/30 ó PY-6/D 70/30, y el valor 0,62% de la torta P-1/D 70/30,

- a la edad de 90 días, entre el valor 0,25% anterior y el valor 1,00% de la torta P-1/D 80/20 ó 70/30, y

- a la edad de 730 días, entre el valor 0,50% de la torta del PY-4/D 70/30, y el valor 7,23% de la torta P-1/D 80/20, que, prácticamente son despreciables respecto a las anteriores, pudiéndose considerar por tanto en este caso, que no en aquél, prácticamente iguales todos los valores de  $\Delta\emptyset$ , sea cual fuere el cemento de mezcla de que se trate y sobre todo, sea cual fuere el contenido de  $C_3A$ , del cemento portland constitutivo, y tanto mas iguales cuanto menor sea la edad del ensayo que se considere.

6º.- Los 15 cementos de mezcla preparados con la puzolana referencial silícica D (100%) han resultado ser, según este método de ensayo, L-A, de elevada PS, puesto que según la Tabl. 18 el  $\Delta\emptyset_{28d}$  respectivo ha resultado ser menor del 1,25%.

#### Interpretación VIII.1.2.2.1 (E)(F)

De la Discusión 1ª: Probablemente todo ello se deba tanto al efecto diluyente o dispersante de la puzolana D al actuar, en una cierta medida como un INERTE<sub>RS</sub> aparente, cuanto al comportamiento adicional de como tal puzolana. Por lo tanto, ello deberá llevar implícito que,

- al menos por lo de INERTE<sub>RS</sub>, aparente ó no, todas las reacciones de formación de ett-lf y sus consecuencias expansoras, o sea, disminución de los  $\Delta\emptyset$  respectivos, deberán,

. minimizarse en cuantía, ver Tabla 17, al ser menor lógicamente las cantidades presentes de su reactivo,  $C_3A$ , originario en cada cemento de mezcla citado, y consiguientemente

. finalizarse antes que en su cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY solo,

por lo que todo ello se deberá traducir en menores valores de  $\Delta\emptyset$ ,  $Vc\emptyset$  y PAV de sus tortas respectivas, a igualdad de edad del ensayo, en especial los de  $Vc\emptyset$  que deberán disminuir notablemente mas pronto aún que los de aquél P ó PY respectivo solo, y

- al menos por lo de tal puzolana, los geles  $CSH_{SiO_2}$  de origen puzolana D dificulten el trasiego iónico, impidiendo de este modo la formación de la ett-lf prevista en cada cemento de mezcla, mas cuanto menor es la C/S y menor aquella prevista a formar.

Y en principio se le ha llamado aquí efecto de un "INERTE<sub>RS</sub> aparente" porque si así no fuera, y si "INERTE<sub>RS</sub> a secas", a igualdad de edad, los  $\Delta J$  de las tortas de sus cementos de mezcla correspondientes 80/20, 70/30 y 60/40, deberían de ser exactamente un 80%, 70% y 60% respectivamente, del  $\Delta J$  de la torta de su cemento portland matriz acompañante P-1 solo, es decir, en este caso, véase Tabla 20,

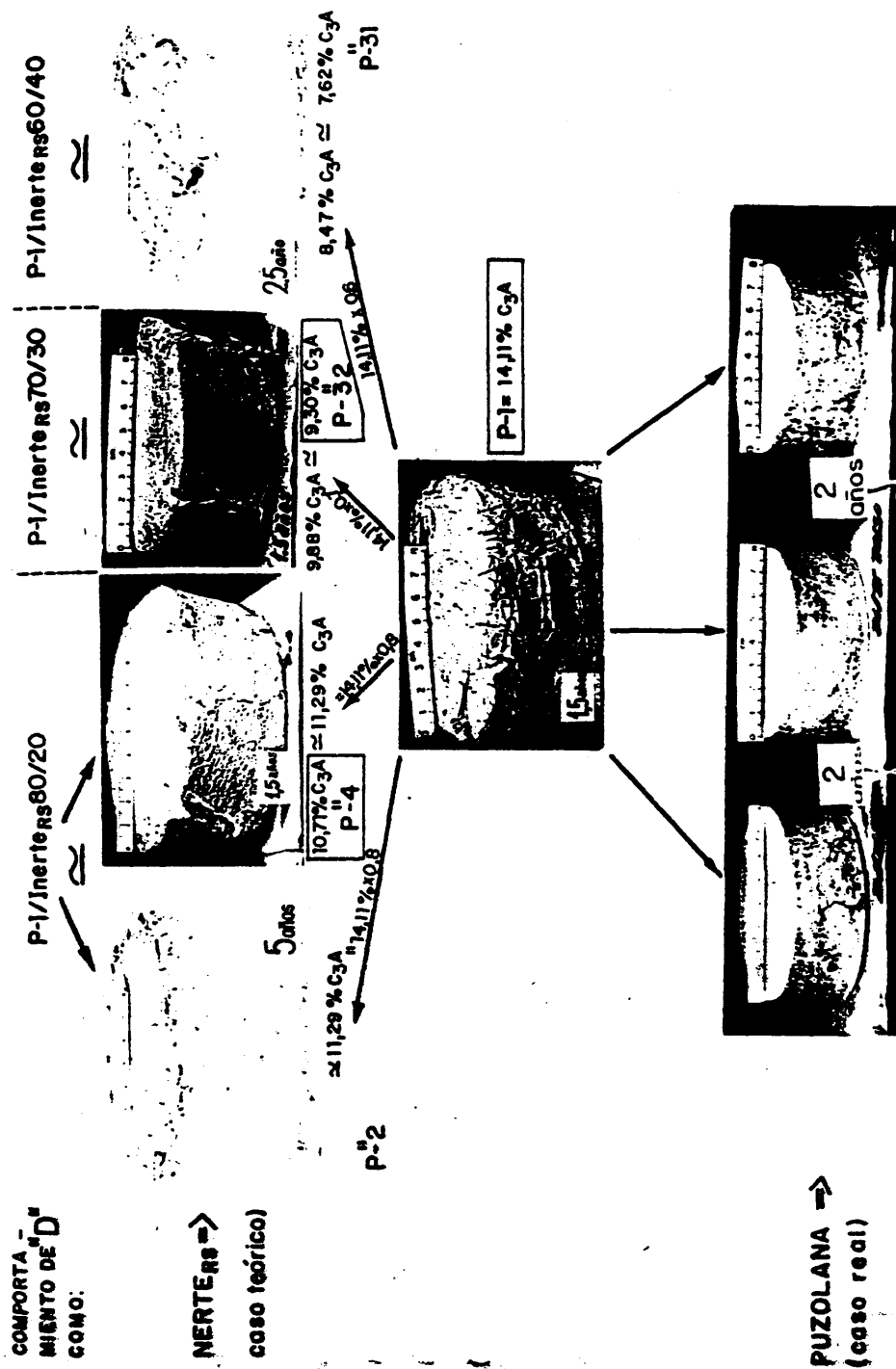
Tabla 20

EDAD (días)	C E M E N T O					
	P-1/D 80/20		P-1/D 70/30		P-1/D 60/40	
	$\Delta J(\%)$ P-1 100/00	$D=Inerte_{RS}$ $\times 0,3 \times \Delta J P-1$	$D=Puzolana$	$D=Inerte_{RS}$ $\times 0,7 \times \Delta J P-1$	$D=Puzolana$	$D=Inerte_{RS}$ $\times 0,6 \times \Delta J P-1$
1	1,62	1,30	0,13	1,13	0,37	0,97
7	4,74	3,79	0,37	3,32	0,44	2,84
28	8,23	6,58	0,50	5,76	0,62	4,94
90	14,71	11,77	1,00	10,20	1,00	8,83
120	16,58	13,26	1,62	11,61	1,37	9,95
365	25,94	20,75	2,37	18,16	1,62	15,56
545	42,14	33,72	3,79	29,50	1,62	25,28
720	49,37	39,50	7,23	34,56	1,62	29,62

ó al menos del mismo orden y muy similares, hecho éste que no ocurre en absoluto ni por aproximación, lo cual viene a confirmar el calificativo de "INERTE<sub>RS</sub> aparente" dádole, al principio de esta interpretación, a la puzolana referencial silícica D.

Por otra parte el hecho acaecido de que en todas las tortas, el máximo valor de su  $V_{c0}$  se alcance durante los primeros 28 días de edad de las mismas, siendo prácticamente despreciables los del resto, confirma la idea de que la actividad puzolánica residual (el por qué de residual se explicará mas adelante), de la puzolana D, acaba por verificarse mayoritaria y sobradamente para el fin deseado, durante los primeros 28 días de edad de aquellas.

Y en cuanto a la nulidad, en todos los casos, de los valores alcanzados en el parámetro PAV, se puede decir con fundamento que ello es señal inequívoca de lo notablemente fraguadas y endurecidas que están TODAS las tortas preparadas con esta puzolana D, lo cual ha de serle imputado necesariamente a la gran hidraulicidad residual



de la fracción de la misma presente en cada una de ellas, y no a la de la fracción de cemento portland matriz acompañante correspondiente, sobre todo si éste fuere del tipo P mas que PY. Pues si la presencia cualitativa común y cuantitativa de dicha puzolana en todas y cada una de ellas respectivamente, es un índice evidente, éste se convierte en irrefutable por el hecho de que,

- en las tortas de los primeros, los cementos P, no se originaron en ningún caso, cuando se ensayaron solos, ya que la nulidad de los valores de tal parámetro, no se alcanzó prácticamente en ellas en ninguna de las edades del ensayo, véase Tabla 17, y
- en las tortas de los segundos, los cementos PY, pese a originarse tal valor nulo, cuando se ensayaron solos, durante las edades iniciales e intermedias del ensayo, el mismo no se pudo mantener durante el resto de las mismas, es decir, durante las edades finales, véase Tabla 17.

Finalmente y respecto a la referencia realizada anteriormente sobre la gran hidraulicidad residual de la fracción correspondiente de puzolana D en cada torta, conviene aclarar que la misma es consecuencia directa de la operatividad del propio método de ensayo L-A, pues justo es reconocer que durante los 14 días de hidratación acuosa a que es sometido el cemento de mezcla PA y/o PUZ correspondiente una vez tamizado totalmente por el tamiz de 88  $\mu$ m de luz de malla, antes de fabricar su torta respectiva, lógicamente esta puzolana D ya ha empezado a actuar como tal puzolana, es decir, ya ha debido de formar geles  $CSH_{SiO_2}$ , según lo dicho en la conclusión VII.4.2,12ª (POP), que se podrían denominar 1<sup>ros</sup>, los cuales, a tenor de los valores de  $\Delta \emptyset$ ,  $Vc\emptyset$  y PAV ulteriores de su torta respectiva (nulos en casi todas las tortas y edades del ensayo, menos a edades tardías en la torta P-1/D 80/20 el  $\Delta \emptyset$  y  $Vc\emptyset$  que no el PAV que continuó siendo nulo),

- no deben de ser la totalidad de los que puede formar la fracción puzolana D en cada caso, y
- deben de actuar, en su torta correspondiente, contra el ataque selenitoso tan severo, desde el instante mismo de su fabricación, a partir del cual se le irán sumando poco a poco en dicha acción de "anti-ataque sulfático" aquellos otros "hermanos" residuales, los 2<sup>ros</sup>, que se deben de ir formando durante la hidratación selenitosa lenta y gradativa de la misma, tenga poco ó mucho  $C_3A$

su cemento portland matriz constitutivo, en cuyo último caso dicha torta quizás pudiera llegar a resquebrajarse, pero muy tardíamente, si se dan en la misma las condiciones necesarias y suficientes para ello, como son, máximo contenido posible de  $C_3A$  y mínimo correspondiente de puzolana D, como así ha ocurrido en este trabajo con la torta correspondiente al cemento de mezcla P-1/D 80/20, véase Fots. 1 y 2.

Por todo ello y puesto que según la conclusión VII.4.2.12\* (POP), los geles  $CSH_{SiO_2}$  no forman sulfato-silicatos de calcio hidratados,  $\overline{SSCH}$ , el crecimiento ulterior, en su caso, de aquella, habrá de ser debido a las posibilidades reales (por impedimento, como se verá, de aquellos), de hidratación selenitosa de los  $C_xA_yH_z$ , principalmente, correspondientes a la fracción cemento portland, P

acompañante respectiva, formados al mismo tiempo y en el mismo seno que los  $CSH_{SiO_2}$  <sup>1<sup>rios</sup></sup> anteriores. De aquí que al poder utilizar el  $\Delta \emptyset$  máximo del 1,25% a la edad de 28 días de su torta correspondiente cuando se ensayaron solos, para poder calificarlos como de elevada, ó no, resistencia al ataque de los iones sulfato, con mayor razón aún se podrá utilizar dicha especificación en cantidad,  $\Delta \emptyset$  máximo 1,25%, y edad, 28 días, para igual fin, con sus cementos de mezcla PA y PUZ que se preparen con esta puzolana D y/o similares.

De la Discusión 2\*: Probablemente ello sea debido a la posible razón dada al principio de este apartado de que a mas puzolana añadida mas "huecos" tendrá la torta 60/40 que la 70/30 y ésta que la 80/20, correspondientes, lo que comportará un mayor poder de humectación de las mismas, en dicho orden, de mas a menos, y por lo tanto una mayor hidratación de su  $C_3A$  respectivo, aportado por la fracción de cemento portland matriz P-1 acompañante, aunque el contenido absoluto de dicho  $C_3A$  en aquella 60/40 sea el menor de todos. Ello se traduciría en que en dicha torta 60/40 se deberá formar mas  $ett-lf$  que, en la 70/30 y en ésta que en la 80/20, con la disminución diametral correspondiente en el citado orden, como así ha ocurrido en este trabajo durante las edades iniciales del ensayo hasta la de 60 días.

Además esta hipótesis explicativa se ve apoyada por el hecho de que en el caso opuesto, de que el cemento portland matriz acompañante sea un PY de contenido nulo de  $C_3A$ , como es el PY-4 ó el PY-6, todo lo dicho anteriormente no se cumple, sino todo lo contrario,



pese a tener que hidratarse la torta 70/30 mas que la 80/20 hermana (siendo la  $h$  de la 70/30 = 37,65 mm  $>$   $h$  de la 80/20 = 37 mm). Luego al ser el contenido de  $C_3A$  (causa de tipo químico) lo único que los diferencia a ambos casos opuestos citados (de matriz P ó matriz PY de  $C_3A = 0,00\%$ ), a ella únicamente le habrá de ser imputable fundamentalmente el origen de los mismos,  $\Delta \emptyset$  y  $Vc\emptyset$  y su disminución relativamente pronta, junto con la causa primitiva aleatoria y/o coadyuvante de tipo físico, como es la existencia inicial de mayor porosidad (por la razón apuntada al principio de este apartado) y por ello de mayor hidratación de la torta 60/40 que de la 70/30 y que de la 80/20, por este orden, según los resultados de porosidad confirmatorios obtenidos en mortero, ver Tablas 32, 45 y 47.

De igual modo y por idéntica razón aplicable al caso anterior de que el cemento portland matriz acompañante sea un P, así como también por la Conclusión VII.4.2.1\* (POP), el mayor contenido de  $C_3A$  del cemento de mezcla 80/20 sobre el 70/30 y éste sobre el 60/40 correspondientes, posiblemente tarde o temprano hará que se produzca mayor cantidad de  $ett-lf$ .

Por lo tanto la torta del cemento de mezcla 80/20 -que originalmente habría sido la que menos se hidrataría, siendo paradójicamente la que mayor cantidad de  $C_3A$  contiene-, deberá originar, en cada caso, a edades mas tardías, mas  $ett-lf$  que la 70/30 y ésta que la 60/40, correspondientes; de aquí que los  $\Delta \emptyset$  respectivos acaben disminuyendo en dicho orden, con el transcurso de la hidratación, como así ha ocurrido en este trabajo, véanse Fots. 1 y 2.

Finalmente y en cuanto al último párrafo de la Discusión 2\*, probablemente ello sea debido a la causa opuesta a la de los dos primeros casos y es que al tener ambos cementos portland matrices PY-4 y PY-6 prácticamente nada de  $C_3A$ , la formación subsiguiente de  $ett-lf$  y su efecto expansivo correspondiente han de ser prácticamente nulos y si sólo en cambio, quizás, el de la formación de portlandita mayormente de la hidratación de los silicatos, hecho este muy común en este tipo de cementos durante su hidratación, con sus posibles efectos expansivos, de aquí que según ello, al tener ambos cementos PY-4 y PY-6 distinto contenido de  $C_3S$ , 58,19%, contra 79,45%, respectivamente, se tendría que cumplir que

- a) el  $\Delta \emptyset$  PY-4/D 80/20  $>$   $\Delta \emptyset$  PY-4/D 70/30, y
- el  $\Delta \emptyset$  PY-6/D 80/20  $>$   $\Delta \emptyset$  PY-6/D 70/30

- b) el  $\Delta \emptyset$  PY-4/D 80/20 <  $\Delta \emptyset$  PY-6/D 80/20, y  
 el  $\Delta \emptyset$  PY-4/D 70/30 <  $\Delta \emptyset$  PY-6/D 70/30

principalmente, como así ha ocurrido en este trabajo, véase Tabla 19.

De la Discusión 3ª: Ello no tiene otra explicación posible mas que el comportamiento sobre todo, como tal puzolana, como ya se apuntara en la interpretación de la Discusión 1ª, Tabla 21, con lo que a tenor de los resultados experimentales obtenidos se podría evitar:

- a) el efecto expansivo y lixiviante de la cal de hidrólisis de los componentes aún anhidros,  $SC_3$ ,  $SC_2$  y  $C_4AF$  principalmente con formación de los compuestos de calcio hidratados correspondientes y  $CO_3Ca$  que a modo de "halo" bordea las fisuras, sobre todo en el caso de las tortas correspondientes de los cementos PY-4 y PY-6 solos, Fot. 1, cuyas expansiones respectivas aparecen menores, ó no aparecen por este orden, en las tortas de sus cementos de mezcla correspondientes preparados con esta puzolana D, lo cual viene a confirmar la interpretación dada a la discusión 4ª correspondiente a cementos P y PY solos, así ensayados.
- b) el efecto expansivo inherente a la formación de etf-lf.

Y la razón de ello ha de estribar en que si la torta del cemento portland matriz P-1 solo, fisura, resquebraja y rompe antes de la edad de 90 días, Fig. 1, (en mayor cuantía aún, a edades posteriores), igualmente y con mas razón le habría de ocurrir, al menos a la misma edad o antes quizás, a sendas tortas L-A preparadas con tan sólo un 80%, un 70% y un 60%, en peso, respectivamente, de dicho cemento matriz, P-1 y el resto correspondiente hasta el 100% en cada caso, de un  $INERTE_{RS}$  (supuesto éste en el que la puzolana D actuase sólo como un  $INERTE_{RS}$ ), ya que en estas últimas tortas, Cemento P-1/ $INERTE_{RS}$ , 80/20, 70/30 y 60/40, la relación :

fracción cemento portland matriz P-1 , ó mejor,  
yeso = cnte.

%  $C_3A$  de la fracción cemento portland matriz P-1 , es :  
yeso = cnte.

- a) aún menor que la de la torta preparada con un 100%, de cemento P-1,  
 b) similar, en dicho orden, a la habida en el caso de las tortas de los cementos P-2 (=11,09%  $C_3A \approx 11,29\%$   $C_3A = 80\%$  de 14,11%  $C_3A$  del P-1), ó P-4 (=10,71%  $C_3A \approx 11,29\%$   $C_3A = 80\%$  del 14,11%  $C_3A$  del P-1), P-32 (=9,30%  $C_3A \approx 9,88\%$  de  $C_3A = 70\%$  del 14,11%  $C_3A$  del P-1), y P-31 (=7,62%  $C_3A \approx 8,47\%$   $C_3A = 60\%$  del 14,11%  $C_3A$  del P-1), solos,

respectivos, disponiéndose en las mismas de idéntica cantidad de yeso que en la torta del cemento P-1 solo, pero para "atacar", a menos cantidades (aunque aún elevadas) de  $C_3A$ , 80%, 70% y 60% de 14,11% de  $C_3A$ , respectivamente, véase Fot.2.

Todo ello se tendría que traducir, por tanto, en el agrietamiento y rotura de las mismas antes, por este orden, 60%, 70% y 80%, respectivamente, o al menos al mismo tiempo, que la torta fabricada con un 100% de cemento P-1 ... ; Y eso no ocurre, ni al mismo tiempo!, como se puede observar en la Fot.1 donde tan sólo la del P-1/D 80/20 se agrietó a la edad de 1,5 años y cuando ya para entonces la del P-1 estaba totalmente auto-destruida; es decir, que el fenómeno expansivo por formación de  $ettr-1f$  <sup>2<sup>da</sup></sup> y sus consecuencias funestas, se ve RETRASADO NOTORIAMENTE en el tiempo.

Por todo lo cual cabe preguntarse: ¿Qué ó Quién puede provocar tal retraso ?, ó lo que es lo mismo ¿Qué ó Quién dificulta o impide que la fracción cemento portland matriz acompañante correspondiente del P-1 se vea atacada tempranamente, antes de la edad de 90 días, como cuando se encontraba sólo, en contra de lo que cabría esperar? o lo que es equivalente ¿Qué o Quién hace que la torta de cada cemento de mezcla P-1/D 80/20, 70/30 y 60/40 respectivamente proporcione a cualquier edad del ensayo un  $\Delta\emptyset$  bastante menor que el que respectivamente le debiera corresponder si dicha puzolana D actuase sólo como un  $INERTE_{RS}$  según la Tabla 20 ?, e inevitablemente cabe sospechar que ha de ser la puzolana añadida D, quién provoque tal retraso ó  $\Delta\emptyset$  bastante menor que el que le correspondería si sólo actuase como un  $INERTE_{RS}$ , pudiéndose llegar a decir con fundamento, ante la relativa gran estabilidad alcanzada por las tortas de los cementos de mezcla P-1/D 70/30 y P-1/D 60/40, que incluso ha podido llegar a impedirlo más aún, para este caso de cemento P-1, cuando la misma se encuentra presente con el mismo en un 30% ó en un 40% en peso, respectivamente.

Y el modo de impedirlo ha de ser de la manera que estas puzolanas eminentemente silícicas actúan comúnmente en un medio portlandítico - (y selenitoso en este caso), y es generando los ya conocidos geles  $CSH_{SiO_2}^r$  (171) de la puzolana D en este caso, los cuales deben de entorpecer, dificultar e impedir el trasiego iónico (sulfático en este caso) necesario y suficiente para la formación de ettringita, lo cual se habrá de traducir en menores expansiones y consiguientemente menores  $\Delta\emptyset$  de las tortas correspondientes, en este caso, cuando

dicha puzolana D esté presente y menores aún cuanto más presente esté, como así ha sucedido en este trabajo, no pudiendo ser achacable a las tobermoritas CSH, originadas de la hidratación del  $SC_3$  y/o  $SC_2$  de la fracción cemento portland matriz acompañante P-1, pues cuando éste se ensayó sólo, tales  $CSH_{SC_3}$  y/o  $SC_2$  no impidieron en nada el raudo y temprano resquebrajamiento de su torta a la edad de 1 día, véase Fot.1

Por otra parte y volviendo a los primeros, se puede observar también como su comportamiento depende de su "calidad" y "cantidad", - presente en cada caso concreto, es decir, en tanto en cuanto disminuya en los mismos tal relación, debe aumentar, según los resultados obtenidos, el efecto portector, ó "anti-ataque selenitoso", de la puzolana en cuestión al cemento portland, P-1 en este caso, ó cualquier otro, habiendo de ser dicho efecto protector, mayor aún, cuanto menor sea el contenido de  $C_3A$  de este último, como así ha sucedido en este trabajo, véase Tabla 20.

De aquí que pueda decirse con fundamento, a tenor de los resultados obtenidos, que tal relación C/S "beneficiosa", no es común para TODOS los cementos portland, dependiendo por tanto la misma de la cantidad potencial total de ett-lf, que aquellos puedan formar en cada caso, en función de su contenido de  $C_3A$  respectivo. Por ello, y a diferencia de lo que ocurre con el cemento portland matriz acompañante P-1, en su cemento de mezcla, P-1/D 80/20, la resistencia al ataque selenitoso del cemento portland matriz acompañante P-2 en su cemento de mezcla PA correspondiente, o sea, el P-2/D 90/20, se ve aumentada con tan sólo un 20% de puzolana D añadídale, la cual en este caso debe proporcionar los geles  $CSH_{SiO_2}$  de tal origen D de relación C/S máxima que, pese a ser la mayor de entre los tres cementos de mezcla de cada familia (y similar a la originada en la torta del cemento de mezcla anterior P-1/D 80/20), es como se ve, la adecuada y suficiente en este caso -que no en el de la torta del homónimo P-1/D 80/20-, para impedir o contrarrestar, los efectos perniciosos espectaculares derivados del ataque selenitoso que habría tenido lugar al 80% del cemento P-2 conformante de su torta correspondiente P-2/INERTE<sub>RS</sub> 80/20 ( $11,09\% C_3A \times 0,8 = 8,87 C_3A$ , es decir  $9,30\% C_3A$  del P-32  $> 8,87\% C_3A$  P-2/INERTE<sub>RS</sub>  $> 7,62\% C_3A$  del P-31 véanse Fots. 1 y 2 comparativamente), véase Fot. 1.

Téngase en cuenta además, que por la estructura porosa de las tortas P-1/D 80/20, 70/30 ó 60/40, debido al 20%, 30% y 40%, en peso, de puzolana D presente respectivamente, podrían en teoría,

al hidratarse mas y mejor, por tal motivo, resquebrajarse mas rápidamente, en dicho orden, que la torta del propio cemento portland matriz acompañante P-1 solo, que ha de ser menos porosa según los datos correspondientes en forma de mortero, ver Tablas 28 y 38.

que las de aquellos, sobre todo si D fuera sólo un INERTE<sub>RS</sub>. Y eso no sólo no ocurre, sino que a igualdad de edad ocurre por lo común todo lo contrario (tan solo la torta P-1/D 80/20 llega a resquebrajarse pero muchísimo mas tarde que la de su cemento portland matriz acompañante P-1 solo). Luego ni la puzolana D actúa sólo como un INERTE<sub>RS</sub> aparente, ni pese a facilitar la hidratación rápida de la torta respectiva por los estuches vacíos constitutivos que aporta, permite que ésta se resquebraje rápidamente, sino, en tan sólo un caso, torta P-1/D 80/20, y tardíamente, señal inequívoca de su evidente, típica y característica actuación como tal puzolana - como ya se confirmara por las conclusiones correspondientes del ensayo de Fratini y POP-, merced a los diversos geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}$ - protectores, a que da lugar, antes citados; no habiéndose podido, ni pretendido, averiguar en cada torta preparada al efecto, y mediante los parámetros utilizados en esta parte del trabajo, la constitución y composición química EXACTA de cada uno de ellos, lo cual no es óbice, para poder afirmar con fundamento que la acción protectora ó "anti-ataque selenítico" de los mismos, disminuye con su relación  $\frac{C}{S}$  - por ello el  $\Delta\phi$  aumenta con la disminución de puzolana D y aumento del contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  de su cemento portland matriz acompañante, véase Tabla 20 -, es decir, que según ello, el gel de tobermorita de  $\frac{C}{S} \leq 0,8$ , debe ser más protector que el gel de tobermorita de  $\frac{C}{S} \geq 1$ . Del mismo modo, tampoco se ha podido confirmar, si tal labor protectora es:

- a) como dice Lea (17), debido a la formación de una película protectora de tales geles tobermoríticos diversos de neoformación, y
- b) además como proponen Turriziani y colaboradores (105), mediante la hidrólisis de la ettringita formada mediante una puzolana de estas características (altamente silícica) como es el caso de la D y N empleadas en este trabajo, ó
- c) como creen otros investigadores (107) (108) (274), porque la presencia de la  $\text{SiO}_2$  característica de estas puzolanas altamente silícicas impide la formación de ettringita, no por hidrólisis, sino por posible formación de:
  - sulfato-silicatos de calcio hidratados diversos,  $\overline{\text{SSCH}}$ , ó bien
  - ettringitas con parte de sus iones  $\text{Al}^{3+}$  sustituidos por  $\text{Si}^{4+}$ , ó bien

- alúmino silicatos y sulfato-silicatos de calcio hidratados diversos que en ningún caso se han podido confirmar por DRX, ver Gráfico nº 2, ni por sus consecuencias, como aquella.

No obstante si se ha de señalar aquí que en el primer supuesto posible citado a), sería interesante precisar si la labor protectora de tales geles tobermoríticos diversos de neoformación es o puede ser:

- » a modo de barreras o "tapones" protectores TOTALES, precipitados y repartidos uniformemente por todo el sistema poroso de la torta, merced a idéntico e hipotético mecanismo de "through-solution" de formación de ettringita,
  - bien para situarse única y exclusivamente en él taponándolo totalmente,
  - bien para situarse única y exclusivamente sobre los granos de  $C_3A$  y/o  $Al_2O_3$  principalmente en este caso, formadores ambos de  $\bar{S}ACH$  expansivos en cuyo caso sería muy interesante conocer y precisar el camino y mecanismo(s) de tal "proceso depositante tan específico y selectivo"
  - bien para situarse sobre ambos, y/o
- ) a modo de barreras o compuertas protectoras LOCALES compartimentales distribuidas por igual al azar en toda la masa de la torta o solo en las capas superficiales de la misma a modo de "impermeable" (véase la parte afín de la interpretación VIII.2.2.2.1 (E)), ó
- ) a modo de "almohadillas", (véase la parte afín de la interpretación VIII.2.2.2.1 (E)), y/o
- ) una combinación de todas o sólo algunas de las citadas que, en cualquier caso y según parece dificultan la difusión iónica, en general, y de los iones sulfato en particular (105).

De la Discusión 4ª: Probablemente ello sea también debido a idéntica razón confirmativa anterior, ya que a igualdad de edad y cemento de mezcla, a partir de la edad de 90 días, los  $\Delta\theta$  de P-1/D 80/20 ó 70/30 ó 60/40 habrían de ser mayores que los correspondientes a idénticas mezclas preparadas con el cemento portland matriz P-2, por ser el contenido de  $C_3A$  del P-1, 14,11% mayor que el del P-2, 11,09%, y así sucesivamente, como así ha ocurrido en este trabajo, ver Tabla 19.

De la Discusión 5ª: Ineludiblemente ello ha de serle imputado a la presencia de la puzolana D y más concretamente a los geles  $CSH_{SiO_2}^{r-1\frac{r_{105}}{105}}$  derivados de la misma, y presente, en distinta cuantía y "calidad", C/S, en todas las tortas de los cementos de mezcla PA y/o PUZ, con aquella preparadas.

Pero realmente lo que más llama la atención en este caso es el hecho último discutido; y es que, a tenor de los valores prácticamente iguales, de  $\Delta\theta$  obtenidos, bien podría decirse que, haya presente

mucho ó nada de  $C_3A$ , ó mejor sus hidratos,  $C_xA_yH_z$ , apropiados respectivos, "no actúan", ó mejor, "no se les deja actuar", es decir, fijar  $SO_4^{=}$ , precisamente por culpa de aquellos, los  $CSH_{SiO_2}^r$ - irios formados a la par (en la hidratación simple, durante 14 días, del cemento de mezcla a ensayar, aunque probablemente a distinta  $V_f$ ), según lo dicho en la interpretación de la Discusión 1ª, y presentes en cada torta desde el instante mismo de su fabricación; los cuales, deben de existir, ya para entonces, en la suficiente cuantía en todos los casos como para impedir tal fijación de  $SO_4^{=}$  por parte de aquellos, los  $C_xA_yH_z$ , y su expansión,  $\Delta\theta$ , proporcional correspondiente. De aquí que, por tal motivo, todas las tortas hayan mostrado prácticamente un grado de estabilidad bastante superior a la de su cemento portland matriz constitutivo solo, que ha sido tanto menos estable cuanto mayor era su contenido de  $C_3A$ , y viceversa, en cuyo caso (tortas de los cementos PY-3, PY-4 y PY-6, respectivamente), su grado de estabilidad, a las edades iniciales e intermedias del ensayo, deberá ser muy escasa y coincidir en cierta medida ó ser del mismo ó muy parecido orden de magnitud al de aquellas - aunque en este caso por distinto motivo como es la ausencia prácticamente total de  $C_3A$  en los mismos y consiguientemente de  $\Delta\theta$  expansiva en sus tortas correspondientes - como así ha ocurrido en este trabajo, véanse valores correspondientes del  $\Delta\theta$  y PAV de los cementos P-nº ó PY-nº/D 80/20 ó 70/30 ó 60/40 y PY-nº solos, Tablas 17 y 19.

No obstante lo verdaderamente interesante de esta discusión, no es tanto el haber "atinado", ó no, con su interpretación correspondiente, cuanto si que las conclusiones derivadas de la misma, aunque acertadas al caso, bien pudieran parecer estar lejos de la realidad. Pues a primera vista, y según aquélla, se deduce, a tenor de estos resultados, que la presencia de esta puzolana D, en al menos un 30% en peso, es capaz de originar un cemento de mezcla PUZ de "elevada RS", partiendo de un cemento portland matriz acompañante de aquella, de elevado contenido de  $C_3A$  (el P-1, 14,11%  $C_3A$ ), ¡Siempre y cuando claro está su utilización en la realidad se adapte en todo ó se asemeje bastante a la del presente método acelerado de ensayo de L-A!, lo cual es tecnológicamente posible, sin más que aplicar durante la fase de hormigonado, desencofrado y curado de la estructura de hormigón correspondiente, alguna(s) de las múltiples medidas coadyuvantes existentes al efecto, y encaminadas a proporcionar el tiempo y el medio portlandítico necesarios, y suficientes, para que la puzolana silícica de que se trate forme cantidad suficiente de geles  $CSH_{SiO_2}^r$ - protectores

correspondientes antes de entrar en contacto con el medio sulfático agresivo.

No obstante se sabe que en multitud de ocasiones y por exigencias de la propia obra, las medidas protectoras anteriores no se pueden aplicar, pese a su adecuación y gran bondad de tal tipo de puzolanas para combatir el mencionado ataque agresivo, alejándonos por tal motivo bastante de la fase "hidratación previa del cemento, antes de entrar en contacto con el yeso", del método L-A, para acercarnos, por el contrario, a la correspondiente del método ASTM C 452, en el cual tal tipo de puzolanas D (ó N) actúa cualitativa y cuantitativamente igual aunque de un modo diferente en el tiempo como se verá más adelante en la interpretación correspondiente a esta puzolana D ensayada a través del citado método ASTM C 452.

Por último y antes de finalizar esta interpretación VIII.1.2.2.1 (E), se ha de decir que no se deja de reconocer, al hilo de la Aplicación XI.1.11 (venidera), que globalmente los datos prácticos que en ella se citan para la obtención del máximo mejor comportamiento de esta puzolana D y similares ante un ataque por los iones sulfato al hormigón del que forma parte, se acercan muchísimo a lo que en el sector industrial de la construcción y sus industrias afines (fábricas de hormigón, de cementos, etc.) se entiende comúnmente por "realizar un perfecto y completo CURADO del hormigón antes de su entrada en servicio ...", siendo por tanto a juicio de algunos técnicos ésta la causa fundamental y no la composición química tan característica y el comportamiento puzolánico tan específico de la puzolana D, la que en definitiva origina tan buenos resultados. Por lo que según tal aserto generalizado, cabe pensar que con sólo realizar idéntico CURADO PERFECTO de cualquier otro hormigón de cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con CUALQUIER otra puzolana, sea ésta la que fuese, se originarán siempre tan magníficos y excelsos resultados como con la presente D ... , lo cual desgraciadamente para algunos, no se ve confirmado a la luz de este trabajo y más concretamente a la luz de esta parte VIII.1 del mismo. Pues como se verá más adelante en el caso del empleo de las puzolanas A, C y M, por ejemplo, igualmente ensayadas a través de sus cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes CURADOS del mismo modo a cuando la puzolana D, aquellas no han mostrado tan buen comportamiento como ésta y sí el totalmente contrario, hasta tal punto que las mismas se pueden calificar de NOCIVAS, véase apartados VIII.1.2.2.2. y VIII.1.2.2.3.



Por lo tanto y en definitiva, según este método acelerado de ensayo L-A, (y los métodos ASTM C 452 e H-1, que se verán mas adelante) TODOS los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con la puzolana referencial silícea D (o silícica N), han mostrado, por uno u otro motivo, un grado de RS MAJOR que el de su cemento portland matriz conformante respectivo, P ó PY solo, puesto que tarde o temprano, el valor del  $\bar{A}D$  (ó como se verá mas adelante del  $\bar{A}L$ ) correspondiente a la torta (o probetas) de aquellos ha resultado ser por lo general inferior al de este último, manteniéndose de este modo durante mas tiempo cuanto menor ha sido el contenido de  $SO_3$  del método acelerado de ensayo empleado, ASTM C 452, y viceversa, L-A e H-1, y cuanto mayor ha sido el contenido de  $C_3A$  de aquél y viceversa; y hasta tal punto, que en el caso del método L-A han podido ser calificados de elevada RS, inclusive paraudógicamente por lo extraordinario, los de la familia del cemento portland matriz constitutivo de mayor contenido de  $C_3A$ , 14,11%, es decir, la  $\bar{A}1/D$  60/20, 70/30 y 60/40, puesto que el  $\bar{A}D_{28d}$  ha resultado ser menor del 1,25%, no habiendo ocurrido desgraciadamente otro tanto, como se verá, en los métodos de ensayo H-1 y ASTM C 452, sobre todo en éste último, en el cual idéntica meta se ha alcanzado mediante un cemento portland acompañante de aquella(s), D (y N), de contenido de  $C_3A$  menor del 7,0%, caso del P-5 (6,7%).

VIII.1.2.2.2.- Cementos de Mezcla preparados con la Puzolana Referencial Aluminica, M, véase Tablas 21 y 17.

Dado que en este caso los valores obtenidos de los parámetros  $\Delta\emptyset$ ,  $Vc\emptyset$  y PAV de todas las tortas preparadas con esta puzolana M, han tenido oscilaciones múltiples a lo largo del ensayo, se ha creído conveniente y oportuno estudiarlos de una manera individualizada al objeto de su más cómoda interpretación. A tal fin, se han hecho dos agrupaciones de los mismos, una con la de los parámetros afines  $\Delta\emptyset$  y  $Vc\emptyset$  y otro con el parámetro PAV.

Discusión VIII.1.2.2.2. (E).

(E) Parámetros:  $\Delta\emptyset$  y  $Vc\emptyset$ .

1ª.- En todas las tortas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados al efecto con esta puzolana M, la evolución de los valores del  $\Delta\emptyset$  y  $Vc\emptyset$  correspondientes, ha sido respectivamente,

- $\Delta\emptyset$ , el aumento ha sido, ó más, ó menos ó nada sinuoso, imperando generalmente los primeros, pero teniendo todos ellos de común un gran valor absoluto a la edad de 1 día, el cual se mantuvo prácticamente constante a lo largo del ensayo sólo en los del último caso ó de ausencia de sinuosidad; todo ello consecuencia directa del mayor o menor hinchamiento con resquebrajamiento más o menos acusado de la torta, que llega a destruirla en algunas ocasiones, pero que una vez alcanzado, en su caso, el máximo valor del  $\Delta\emptyset$ , la torta se colapsa tendiendo a fraguar muy lentamente, como se verá más adelante en la discusión de los valores del PAV correspondientes.
- $Vc\emptyset$ , la disminución, previo aumento ó no, ha sido exponencial hasta su práctica nulidad y negatividad rápida en la mayoría de los casos, pero con el hecho notable y destacable, en todos ellos, de que sea cual fuese la torta del cemento de mezcla de que se trate, sus mayores valores de  $Vc\emptyset$  (los máximos, como se verá, de TODOS los obtenidos en este ensayo con el resto de las puzolanas elegidas y así también ensayadas) alcanzados por la misma, se consiguen durante sus primeros 28 días de edad, y más aún se podría precisar que en ocasiones, durante su primer día de edad, el cual va seguido, por lo general en tales ocasiones de una disminución también, muy notable y considerable, que es bastante más brusca que la de su cemento portland matriz P ó PY solo respectivo.

- 2<sup>a</sup>.- El  $\Delta\phi$  de la torta del cemento P ó PY matriz ha resultado ser, en la mayoría de las mediciones realizadas (150 de un total de 168 = 3 cementos de mezcla x 7 cementos matrices x 8 edades/cemento) bastante inferior al de cualquiera de sus cementos de mezcla PA ó PUZ correspondientes,

$\Delta\phi$	P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup> /M ;	100/CO <<< 80/20	$\frac{1}{2}$ 70/30	$\frac{1}{2}$ 60/40	S. a. e.
--------------	---	------------------	---------------------	---------------------	----------

En el resto de las mediciones realizadas, 18, ocurrió lo contrario, siendo paradójico que el mismo ocurriese sólo a la edad inicial o finales, pero nunca en las intermedias de 7 a 180 días.

- 3<sup>a</sup>.- Sea cual fuese la edad o el cemento de mezcla PA ó PUZ de que se trate, el  $\Delta\phi$  de su torta es siempre bastante superior, en la mayoría de las mediciones efectuadas (184 de 186 mediciones, las 2 excepciones a la edad de 1 día), al que le debería corresponder proporcionalmente de aquél, en el supuesto (falso como se ve) de que la puzolana M únicamente hubiese actuado como un INERTES, es decir

S U P U E S T O S	
TEORICO (INERTES)	REAL
$\Delta\phi$ P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup> /M 80/20 = 80% x $\Delta\phi$ P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup>	$\Delta\phi$ P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup> /M 80/20
$\Delta\phi$ P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup> /M 70/30 = 70% x $\Delta\phi$ P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup>	$\Delta\phi$ P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup> /M 70/30
$\Delta\phi$ P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup> /M 60/40 = 60% x $\Delta\phi$ P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup>	$\Delta\phi$ P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup> /M 60/40

- 4<sup>a</sup>.- Caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente sea un P ó un PY, y edad del ensayo de 1 día: la altura inicial de la torta correspondiente fué, por norma, la misma, es decir, 30 cm, para todos y cada uno de los cementos poroso de mezcla PA ó PUZ preparados y ensayados, en el instante mismo de haberlas preparado cada una de ellas, no obstante y a la edad de 1 día, tal altura inicial, igual para todas ellas, aumentó en estos últimos, siendo, tan espectacular aumento, común en TODAS ellas, y confirmado por los valores de  $V_{c\phi}$  correspondientes; y ya no sólo de altura sino también de diámetro (directamente proporcional al porcentaje de puzolana M añadida) ya fuese P ó PY el cemento portland matriz acompañante, es decir

$\Delta \emptyset$ $\Delta h$	P-nº ó PY-nº/M; 80/20 < 70/30 < 60/40	a 1 día
----------------------------------	---------------------------------------	---------

$\Delta \emptyset$ $\Delta h$	P-5 ó PY-nº/M; 100/00 < 80/20 < 70/30 < 60/40	a 1 día
----------------------------------	---	---------

Y todo ello ocurre habiendo recibido en 24 horas TODAS las tortas idéntica cantidad de hidratación.

Por lo tanto se puede decir con fundamento que impera el efecto químico directo de la sustitución física de cemento P-nº ó PY-nº por puzolana M.

- 5º.- Caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente sea un P, y hasta la edad del ensayo de 7 días: los  $\Delta \emptyset$  de las tortas hasta los 7 días de edad, fueron directamente proporcionales a la cantidad de puzolana M presente añadida, es decir,

$\Delta \emptyset$	P-nº/M; 100/00 < 80/20 < 70/30 < 60/40	a 7 días
--------------------	--	----------

Por tanto se puede decir que impera el efecto químico directo de la sustitución física de cemento P-nº por puzolana M.

- 6º.- Caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente sea un P ó un PY, y desde la edad de ensayo de 7 días hasta la de 90 días: En general, durante este periodo de tiempo, las tortas de unos cementos de mezcla se mantienen conforme venían del periodo de tiempo anterior, caso de los P-1/M, P-5/M y PY-6/M, mientras que las del resto, tienden a evolucionar en el sentido de intentar cambiar, tarde o temprano, el orden de la discusión anterior que portaban, excepto los del PY-4/M y PY-6/M que no llegan a conseguirlo ni a la edad de finalización del ensayo, de aquí que la torta de cemento de mezcla 70/30 de los mismos, tenga de principio a fin del ensayo su diámetro, mayor que el de sus tortas hermanas correspondientes, 80/20 y 60/40.

- 7º.- Caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente tenga un contenido de  $C_3A$  menor del 7,0%, y desde la edad de ensayo de 90 días en adelante: Por lo general a partir de esta edad en adelante, los  $\Delta \emptyset$  de cada "familia" son inversamente proporcionales a la cantidad de puzolana M añadida a cada una de ellos, excepto en las correspondientes a la familia de cementos de mezcla PY-6/M, parcialmente, y las del PY-4/M,

totalmente,

>Δ Ø>	P-5 ó PY-1/M; 80/20 > 70/30 > 60/40 > 100/00 de 90 a 730 d.
-------	---

Por lo tanto se puede decir que, generalmente, impera el efecto químico inverso de la sustitución física de cemento por puzolana M.

8ª.- El Δ Ø de las tortas a las últimas edades del ensayo, suele, por lo general, aumentar conforme disminuye el contenido de  $C_3A$  del cemento P ó PY acompañante, dándose paradójicamente los valores mas altos del mismo en las tortas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con los cementos P-5 (6,83%  $C_3A$ ), PY-1 (3,83%  $C_3A$ ), PY-4 (0,00%  $C_3A$ ) y PY-6 (0,00%  $C_3A$ ).

9ª.- Con respecto a la  $VcØ$  no se puede decir otro tanto al igual que ocurriere con el Δ Ø en la discusión anterior, pues de 168 mediciones realizadas (21 cementos de mezcla x 8 edades/cemento), tan solo 95 (≈ 56,6%) resultaron tener su  $VcØ$  superior a la del cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY solo, mientras que el resto de los casos 73 (≈ 43,4%) ha ocurrido lo contrario.

Asímismo y por su interés se ha de constatar que las primeras se han repartido del siguiente modo:

a) Por lo general el tipo de cemento de mezcla cuya torta correspondiente dió mayor número de ellas fuera cual fuese su cemento P ó PY, fue el 80/20 (37 mediciones dieron mayor  $VcØ$  que el cemento matriz acompañante correspondiente P ó PY solo), seguido del 70/30 (34 mediciones) y por último el 60/40 (24 mediciones),

b) Por otra parte, la distribución aproximada de las mismas en función del contenido de  $C_3A$  del cemento matriz acompañante correspondiente P ó PY en cada caso, fue como sigue:

- tipo de cemento de mezcla 80/20: por lo general el número de ellas ha aumentado ligeramente con la disminución del contenido de  $C_3A$  de su cemento matriz acompañante correspondiente P ó PY.

- tipo de cemento de mezcla 70/30: por lo general el número de ellas ha aumentado notablemente con la disminución del contenido de  $C_3A$  de su cemento matriz acompañante correspondiente P ó PY, llegando a igualar y superar inclusive al número de sus correspondientes hermanas anteriores conforme tal contenido de  $C_3A$  de su cemento matriz acompañante correspondiente P ó PY, disminuya hasta la nulidad, y discrepar notablemente del número correspondiente a los mismos en el caso contrario, o sea, de que tal contenido de  $C_3A$  de su cemento matriz acompañante correspondiente P ó PY aumentaba,
- tipo de cemento de mezcla 60/40: por lo general ha ocurrido otro tanto similar al caso anterior pero en mucha menor cuantía en cada supuesto extremo citado de contenido opuesto, mucho o nada, de  $C_3A$ .

10ª.- Por lo general la  $Vc\theta_{max}$  se alcanza antes conforme aumenta la cantidad de puzolana M añadida, hasta tal punto que:

- en el caso de los cementos de mezcla 60/40 la  $Vc\theta_{max}$  (4 casos de un total de 7) la alcanza a la edad de 1 día, y los tres restantes a la edad de 7 días
- en el caso de los cementos de mezcla 70/30 la  $Vc\theta_{max}$  (5 casos de un total de 7) la alcanza a la edad de 7 días, y los dos restantes a la edad de 1 día
- en el caso de los cementos de mezcla 80/20 la  $Vc\theta_{max}$  (5 casos de un total de 7) la alcanzan a la edad de 7, y los dos restantes a la edad de 28 días

11ª.- Por lo general a la edad de 1 día la  $Vc\theta$  aumenta con la cantidad de puzolana M añadida, sea cual fuese el cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY, es decir

$< Vc\theta <$	P-nº ó PY-nº/M ;	80/20 < 70/30 < 60/40	a 1 día
----------------	------------------	-----------------------	---------

Por el contrario a la edad de 7 días ya no ocurre ésto mismo, de modo y manera que a partir de la edad de 28 días y hasta finalizar el ensayo ocurre todo lo contrario que al principio, o sea, que la  $Vc\theta$  disminuye con la cantidad de puzolana M añadida, es decir

$> Vc\theta >$	P-nº ó PY-nº/M ;	80/20 > 70/30 > 60/40	de 28 a 730 d.
----------------	------------------	-----------------------	----------------

siendo además y en cualquier caso el orden de magnitud infinitamente menor que el del principio (y en ocasiones de signo contrario y menor aún conforme aumentó la cantidad de puzolana M añadida a cualquier familia).

En definitiva que para cualquier familia, la  $V_{c0}$  se minimiza más y más rápidamente que la de su cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY, conforme aumentó la cantidad de puzolana M añadida; partiendo siempre a 1 ó 7 días de un valor mayor conforme más  $C_3A$  tuviese el cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY respectivo.

12<sup>a</sup>.- Por otra parte se cumple además que por lo general a igualdad de cemento de mezcla la  $V_{c0}$  es mayor si el cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY en su caso, tiene  $C_3A$ , que si no tiene, no existiendo generalidad alguna entre los cementos de mezcla componentes de ambos grupos a no ser que en aquellos 60/40 cuyo cemento portland matriz acompañante correspondiente posee poco ó mucho  $C_3A$ , donde por lo general su  $V_{c0_{max}}$  se alcanza en casi todos ellos (menos el P5/M 60/40) a la edad de 1 día, mientras que en casi todos (menos los 70/30 del P-2/M y P-31/M) los hermanos correspondientes se alcanza a la edad de 7 días, y para mayor detalle aún, remitirse a la discusión anterior 10<sup>a</sup>.

13<sup>a</sup>.- Igualmente se cumple que para cualquier cemento de mezcla la  $V_{c0}$  de su torta correspondiente decrece por lo general,

- con disminuciones muy notables, diríase mejor descensos bastante bruscos, a partir de la edad de 1 día, siendo por lo general mayores los mismos, conforme aumenta la cantidad de puzolana M añadida y conforme aumenta el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY, y

- con altibajos pequeños al resto de las edades, los cuales por lo general disminuían a igualdad de edad excepto las iniciales en todas las familias de cementos de mezcla preparadas y ensayadas conforme aumentaba la cantidad de puzolana M añadida, llegando a tomar valores negativos en la última de las mezclas, o sea, la 60/40 que es la que menores valores portaba generalmente, al contrario que su torta hermana extrema 80/20,

pero no obstante y en cualquier caso tanto el máximo valor de la  $V_{c0}$  como el de la pendiente correspondiente a su curva representativa, se ha alcanzado siempre dentro de los primeros 28 días de edad del ensayo de su torta correspondiente.

- 14.- Si la  $V_{c0}$  de la torta de cualquier cemento matriz acompañante correspondiente P solo es la consecuencia directa del  $\Delta\emptyset$  diario sufrido por su torta a lo largo del tiempo de duración del ensayo y éste debido a su vez, a la  $ett-lf$  ó de origen  $C_3A$  del mismo, obsérvese que la acción (mayor  $\Delta\emptyset$  y  $V_{c0}$ ) de la misma se potencia, sobre todo a las primeras edades, enormemente, pero siempre guardando una relación directa con la cantidad de puzolana M añadida al mismo. Y para dichas edades iniciales se origina más tarde ó más pronto, por este orden, el efecto contrario, conforme se aumenta dicha cantidad de puzolana M añadida.
- 15.- Si la  $V_{c0}$  de la torta de cualquier cemento de mezcla PY-4/M ó PY-6/M es la consecuencia directa del  $\Delta\emptyset$  diario sufrido por su torta correspondiente a lo largo del tiempo de duración del ensayo, y éste debido a su vez única y exclusivamente a la  $ett-rf$  de origen  $Al_2O_3^F$  de la puzolana M añadida en cada caso, obsérvese que la acción (mayor  $\Delta\emptyset$  y  $V_{c0}$ ) de la misma se potencia, sobre todo a las primeras edades, enormemente, pero con la presencia de  $C_3A$  más aún, de tal modo que si la cantidad de  $C_3A$  es baja o media (caso del PY-1, P-5 y P-31) la potenciación es elevada, y rápida, (mayormente a 1 día de edad), y si es alta (caso del P-1 y P-2) la potenciación sigue siendo elevada y rápida (a 1 día de edad) para aquellos cementos de mezcla cuyo contenido de  $C_3A$  sea del orden de los anteriores citados, caso de los P-1/M 60/40, P-2/M 70/30 y P-2/M 60/40, y elevada y algo más lenta (7 días) si el  $C_3A$  correspondiente es elevado caso de P-1/M 80/20 y 70/30 y P-2/M 80/20.
- 16.- Los 21 cementos de mezcla preparados con la puzolana referencial aluminica M (100%), han resultado ser, según este método de ensayo, L-A, de baja o escasa RS, puesto que según la Tabla 18, el valor del  $\Delta\emptyset_{28d}$  de su torta respectiva ha resultado ser  $>4,00\%$ .

#### Discusión VIII.1.2.2.2 (F) (cont.)

(F) Parámetro: PAV.

- 1.- En todas las tortas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados al efecto con esta puzolana M, la creación y evolución de los valores del PAV correspondientes han sido respectivamente:
- tortas de los cementos de mezcla 80/20 y 70/30: de aumento más o menos rápido ó lento, hasta alcanzar un valor máximo (superior a 40 mm), el cual se mantiene,



- ó desde la edad de 7 días, hasta final del ensayo,
- ó durante una, dos, tres ó cuatro edades intermedias o finales del ensayo, 270, 365 ó 545 días, tras las cuales se produce el descenso correspondiente colapsándose muy lentamente la torta hasta la edad final del ensayo.
- tortas de los cementos de mezcla 60/40: de aumento tanto más similar al "acampanado" anterior, con valor máximo ( $>$  de 40 mm) ó ( $<$  de 40 mm), cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante correspondiente, y viceversa, hasta llegar inclusive al caso totalmente opuesto, es decir, el de la nulidad más absoluta en los valores del PAV, de principio a fin del ensayo, como ha ocurrido en la torta PY-4/M 60/40.

No obstante desde la edad de 1 a 180 días se observa como existen notorias analogías y notables discrepancias aparentes, tanto de las tortas de los cementos de mezcla PA ó como en los de los PUZ de un mismo o diferente cemento portland matriz acompañante P ó PY. Así por ejemplo, analogías claras resultan ser TODAS las tortas de los cementos de mezcla 60/40, ya sea P ó PY el cemento portland matriz que las constituya, pues a diferencia del resto, - notables discrepancias -, 80/20 y 70/30, con ausencia de fraguado, caso de la torta del cemento de mezcla P-1/M 60/40, o con fraguado, caso de las tortas de los cementos de mezcla PY-4/M 60/40 y PY-6/M 60/40, respectivamente, todas tienden a fraguar muy lentamente, llegándolo a conseguir inclusive si el ensayo se hubiese prolongado por más de dos años; habiendo sido dicha velocidad de fraguado aún menor (tiempo de fraguado aún mayor), conforme la fracción de cemento portland matriz acompañante correspondiente P, aporta - por poseerlo ya de por sí - mayor cantidad de  $C_3A$  a la mezcla en cuestión.

- 2ª.- Por lo general sea cual fuere el cemento P ó PY acompañante se cumple que a la edad de 1 día el PAV de la torta correspondiente es directamente proporcional a la cantidad de puzolana "referencial" M o añadida, es decir,

$\langle \text{PAV} \rangle$	P-nº ó PY-nº/M; 80/20 < 70/30 < 60/40	a 1 día
------------------------------	---------------------------------------	---------

Por lo tanto se puede decir que impera el efecto químico directo de la sustitución física de cemento P ó PY por puzolana M.

3\*.- Por lo general, a igualdad de cemento de mezcla cuyo cemento P ó PY posea  $C_3A$  y a la edad de 1 día, el PAV disminuye con el aumento en el contenido de  $C_3A$  del cemento matriz acompañante respectivo, P ó PY, es decir,

>PAV>	P-1/M 80/20> P-2/M 80/20> P-31/M 80/20> P-5/M 80/20	a 1 día
	P-1/M 70/30> P-2/M 70/30> P-31/M 70/30> P-5/M 70/30	a 1 día
	P-1/M 60/40> P-2/M 60/40> P-31/M 60/40> P-5/M 60/40	a 1 día

4\*.- Lo anterior no es aplicable para el caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente sea un PY con un contenido nulo de  $C_3A$ .

5\*.- Desde la edad de 120 días hasta la finalización del ensayo: Existe una analogía en todas las tortas de los cementos de mezcla PA ó PUZ preparados y ensayados, ya fuere el cemento portland matriz acompañante P ó PY.

6\*.- En el caso de las tortas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con cemento PY prácticamente exentos de  $C_3A$ , caso de las familias, PY-4/M 80/20, 70/30 y 60/40, y PY-6/M 80/20, 70/30 y 60/40, respectivamente, se tiene:

- a) Caso de los cementos de mezcla 80/20 y 70/30: Mientras en las tortas preparadas con el cemento portland matriz acompañante PY-4, el PAV es máximo desde la edad de 7 a la de 730 días, en las homónimas del PY-6, el máximo se alcanza a partir de los 120 días de edad, llegándose al mismo de forma gradual.
- b) Cementos de mezcla 60/40: Aunque los valores iniciales y posteriores del PAV, de las tortas de los mismos, evolucionen a lo largo del ensayo de distinta manera, los del cemento matriz acompañante correspondiente PY-4, son nulos desde 1 a los 730 días de edad, mientras que los del PY-6, empiezan por la nulidad hasta los 7 días de edad, para tras alcanzar el valor máximo a los 28 días de edad, disminuir seguida y progresivamente hasta hacerse casi nulos a la edad final del ensayo.

o Tipo do produto: torta L-1  
o Perímetro(s) medido(s) ao se nome:  $\Delta \theta (t)$ ,  $\gamma \overline{C} \theta (d\Delta \theta / d f_2)$

**TABLA 21**

10. Fotografia(s) correspondente(s) e data  
Total: 14.213

Dado Eixo	CEMENTO P-1 / PUZOLANA M			CEMENTO P-2 / PUZOLANA M			CEMENTO P-3 / PUZOLANA M			CEMENTO P-4 / PUZOLANA M			CEMENTO P-5 / PUZOLANA M			CEMENTO PT-1 / PUZOLANA C			CEMENTO PT-2 / PUZOLANA C		
	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40
1	0,50	0,70	0,80	1,00	1,20	1,30	0,80	0,80	1,20	1,20	1,30	1,30	0,80	0,80	1,20	1,20	1,30	1,30	0,80	0,80	1,20
7	5,30	0,80	1,20	2,30	2,50	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50
14																					
21																					
28	19,80	0,70	1,20	2,30	2,50	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50
35																					
42	27,20	0,80	1,20	2,30	2,50	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50
49																					
56	28,80	0,80	1,20	2,30	2,50	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50
63																					
70	35,80	0,80	1,20	2,30	2,50	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50
77																					
84	42,80	0,80	1,20	2,30	2,50	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50
91																					
98	49,80	0,80	1,20	2,30	2,50	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50
105																					
112	56,80	0,80	1,20	2,30	2,50	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50
119																					
126	63,80	0,80	1,20	2,30	2,50	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50
133																					
140	70,80	0,80	1,20	2,30	2,50	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	2,50	2,50	2,80	2,80	1,80	1,80	

Interpretación VIII.1.2.2.2 (E)(F)

Las consecuencias de los valores obtenidos de cada parámetro en esta parte del trabajo, se pueden calificar en mayor o menor medida con el apelativo común de NOCIVAS. Pese a lo cual, al haber sido múltiples y variados los cementos de mezcla preparados y ensayados en este caso, aquéllas han resultado ser también múltiples y variadas, aunque con el apelativo común citado de NOCIVAS. Por tanto, es obvio que la interpretación correspondiente, obligatoriamente habrá de ser común, con las matizaciones consiguientes, para todos ellos.

Y dicha interpretación común ha de pasar forzosamente por tener que señalar al componente común  $Al_2O_3^{r-}$  aportado por la puzolana M en estas tortas, como la causa y origen, entre otros, mas importante de las tan variadas consecuencias nocivas producidas, dada su distinta cantidad presente en cada una de ellas. Por lo tanto:

1º.- La única explicación posible, se ha de basar en el hecho, también común, de que a las edades iniciales de 1 ó 7 días y por las razones que se verán mas adelante, se ha de cumplir que a mas puzolana M añadida al cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY, mas  $Al_2O_3^{r-}$  se aportará al mismo, mas etf- $r_f$  originada por ésta y por lo tanto mayores  $\Delta \emptyset$ , Vc $\emptyset$  y PAV originados, como así ha sucedido en este trabajo, véase Fot. 1; debiendo estribar por tanto las diferencias encontradas, a igualdad de cemento de mezcla y edad inicial del ensayo, en la cantidad de  $C_3A$  aportada por cada uno de aquéllos en cada caso. Ello se ve confirmado:

a) porque tales proporciones causa-efecto no se producen en tan extraordinaria cantidad y precisa relación de la misma, en el caso del  $C_3A$  solo, pues se ha visto en las tortas correspondientes a los cementos P y PY solos

como un aumento gradativo del contenido de  $C_3A$  en los mismos no conduce ineludiblemente:

- ni a tan elevados y rápidos valores alcanzados a tales edades iniciales en tales parámetros de  $\Delta \emptyset$  y Vc $\emptyset$  principalmente, pues en el PAV sólo según que casos, que se explicarán mas adelante,

- ni a un aumento tan ordenado y proporcionado de los mismos, en su torta correspondiente, véase Tabla 17,

de aquí la no coincidencia precisa entre la clasificación de

tales cementos P y PY mediante dichos parámetros y la obtenida mediante su contenido correspondiente de  $C_3A$ , véase Tabla 27, como la habida, para el caso presente de la  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana M en cada torta, bien sólo, ver POP, ó con  $C_3A$ .

- b) porque los efectos  $\Delta \emptyset$ ,  $Vc\emptyset$  y PAV tan notables así originados en casi todas las tortas de los cementos de mezcla preparados con esta puzolana M a tales edades de 1 ó 7 días, no pueden ser adscribibles por tanto, única y exclusivamente, al  $C_3A$  acompañante, en su caso del  $Al_2O_3^{r-}$ , ya que al ir disminuyendo en todas las familias de cementos de mezcla preparadas con esta puzolana M, tal aportación de  $C_3A$  (conforme se aumenta la adición de puzolana M), su nuevo menor contenido no ha originado idéntica disminución precisa de resultados de  $\Delta \emptyset$ ,  $(\Delta h)$ ,  $Vc\emptyset$  y aumento en el PAV, proporcional a las correspondientes disminuciones del cemento portland matriz acompañante correspondiente solo, sino todo lo contrario; es decir, habiendo sido correspondientes, como se ha dicho anteriormente, a la cantidad de  $Al_2O_3^{r-}$  aportada por la puzolana M en cada torta.

Por todo lo cual ha de inculpársele a la puzolana M y mas concretamente a su  $Al_2O_3^{r-}$  constitutiva, la causa de tan notables incrementos morfológicos habidos en todas las tortas a la edad de 1 día, sea cual fuere el cemento portland que la acompañe.

- 2º.- El hecho anterior citado en b) de la presencia conjunta, en su caso, a una misma edad inicial y en cantidades bien diferentes del  $Al_2O_3^{r-}$  y  $C_3A$ , y por consiguiente de ett-rf y ett-lf correspondientes, ha de ser la consecuencia directa de que al hidratarse a un tiempo en cada torta, aquellos, ha de existir forzosamente una competitividad manifiesta entre ambos por la fijación del 15,50% de  $SO_3$  puesto inicial y comunmente como agresivo; cantidad ésta, según la Interpretación VIII.2.2.3(E)(F), 2ª, venidera, mas que suficiente, en el peor de los casos, torta P-1/M 80/20, para pasar ambos compuestos  $C_3A$  y  $Al_2O_3^{r-}$  íntegra y respectivamente a ett-lf y ett-rf. Y a su vez tal competitividad y sus mayores o menores consecuencias destructivas consiguientes, así como también la mayor o menor rapidez de su consecución, han de ser función directa, entre otros, del estado físico-químico mas adecuado de tales reactivos competidores,  $Al_2O_3^{r-}$  y  $C_3A$ , -corres-

pondiéndose el mismo mas, al parecer, con la  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana que con el  $C_3A$  del cemento portland-, así como también de la cantidad presente y superficie específica, de cada uno de ellos, en cada torta y momento del ensayo, causa por la cual al haber sido múltiples y variadas las mismas, múltiples y variadas habrán de ser sus nocivas consecuencias, como así ha ocurrido en este trabajo, véase Tablas 21, 22 y 24.

- 3<sup>a</sup>.- Como consecuencia de lo anterior y de la interpretación VIII. - 2.2.2.3(E)(F), 2<sup>a</sup> venidera, se puede decir con fundamento que en la ettringita TOTAL formada en cada torta y momentos concretos del ensayo de la misma, han de participar conjuntamente, en su caso, y en mayor o menor medida, como se ve por los resultados obtenidos, la ett-rf 1<sup>ria</sup> ó 2<sup>ria</sup> (presente en todas las tortas y por igual en todas aquellas de un mismo cemento de mezcla, ya fuere su cemento portland matriz constitutivo P ó PY), y la ett-lf 1<sup>ria</sup> ó 2<sup>ria</sup> (presente también en todas las tortas, si su cemento portland matriz constitutivo P ó PY lo posee y diferente de una a otra, ya sea, ó no, de la misma ó distinta familia). De aquí que las consecuencias nocivas concretas en cada torta habrán de depender fundamentalmente, entre otros, del grado de participación y por tanto de influencia, que cada sumando, ett-rf ó ett-lf, ejerza, en cada torta y momento concreto de la misma, sobre la ettringita total, mas o menos expansiva, resultante en aquella.
- 4<sup>a</sup>.- Por lo tanto, lo acaecido comunmente, dentro de un margen, en todas las tortas a la edad de 1 ó 7 días, o entre ambas edades, haya estado, ó no, presente el  $C_3A$ , únicamente puede explicarse porque, pese a la competitividad existente citada entre la  $Al_2O_3^{r-}$  (de la fracción puzolana M) y el  $C_3A$  (de la fracción cemento portland), por fijar  $SO_3$  en forma de yeso del 15,50% que poseen inicial y comunmente como agresivo, en el mejor de los casos (torta 80/20 del cemento de mezcla P-1/M) y a igualdad de tal(es) edad(es) inicial(es), la cantidad de ett-rf expansiva formada debe ser fundamentalmente 1<sup>ria</sup> y bastante superior que la correspondiente ett-lf también 1<sup>ria</sup> en su caso. Pues en el supuesto de que ambas ettringitas, ett-rf y ett-lf, de orígenes distintos, tuvieran idéntica Vf (lo cual supondría la primacía del mecanismo de expansividad de aquellas adscrito al modelo

topoquímico sin disolución previa, sobre el resto, lo cual es bastante improbable dado que, como se verá, la  $V_f$  de la ett-rf ha de ser que la  $V_f$  de la ett-lf), debería haber ocurrido todo lo contrario, sobre todo en aquellas familias de tortas cuyo cemento portland matriz es un P, pues por este quiometría y para el caso concreto mas favorable de la familia de los cementos de mezcla P-1/M, se habría de cumplir que la suma ett-lf + ett-rf sería en cada caso \*

$$P-1/M \ 80/20 = 51,68\% + 2,54\% \quad P-1/M \ 70/30 = 45,22\% + 3,81\% \quad P-1/M \ 60/40 = 38,76\% + 5,08\%$$

es decir, que la torta mas "hinchada", a tales edades iniciales, debiera haber sido la 80/20, seguida de su "hermana" la 70/30, y ésta de su "hermana" 60/40, que hubiese sido la menos hinchada de las tres. ¡Y eso no ha ocurrido a tales edades iniciales! (1 y/o 7 días), sino todo lo contrario, ver Fot.1, y además en todas las familias de cementos de mezclas preparadas y ensayadas, cuyo cemento portland matriz acompañante correspondiente es un P, y en casi todas en las que es un PY, (excepto en las del PY-4, porque, - al no aportar prácticamente  $C_3A$  pero tenerlo muy escasamente (0,00%  $C_3A$ , Bogue), no existía acción sinérgica alguna, y - al no aportar  $C_3S$  suficiente para ello, no habrá nivel portlandítico necesario para que se pueda originar TODA la ett-rf, que sería posible, como  $\frac{ria}{1}$ , de aquí que ello si haya ocurrido en igual caso del PY-6 al poder aportar éste más  $C_3S$ , por tenerlo de por sí ( $79,43\% \times 0,6$ ), que aquel, el PY-4 ( $58,16\% \times 0,6$ ) para dicho fin; viéndose esta hipótesis avalada por los resultados correspondientes del ensayo de Fratini, donde a igualdad de edad de 7 días y cemento de mezcla 60/40 con esta puzolana M, ya la  $[CaO]$  de la fase líquida del (los) preparado(s) con el PY-6 es mayor que la del (los) preparado(s) con el PY-4, (véase Fig.4).

5º.-En base a dicha cantidad superior de ett-rf  $\frac{ria}{1}$  que se debe originar, pese a que la estequiometría apuntare lo contrario, a igualdad de edad inicial, de 1 y/o 7 días, se puede deducir que su velocidad de formación ha de ser NOTABLEMENTE SUPERIOR que la correspondiente a la ett-lf  $\frac{ria}{1}$  lo cual es también coincidente con los resultados y conclusiones de la POP (ya vistos) del método ASTM C 452 e H-1 (venideros), y confirmable por el aumento tan notable a tal(es) edad(es) inicial(es) del  $\emptyset$ , h y  $Vc\emptyset$  respectivos de la torta al aumentar la cantidad de puzolana M añadida, haya ó no,  $C_3A$  presente (pues en las tortas de los cementos PY-4 y PY-6 solos, ver Fot.1, eso no ocurre al no haber puzolana M presente), seguido del descenso brusco de la  $Vc\emptyset$  en todos los casos y en dicho orden. De aquí que, a menos cantidad de esta última formada a edades iniciales, mas quedará por formarse a las edades siguientes, y ya sería  $2 \frac{ria}{1}$ , y viceversa. Ello concuerda con los resultados para otros fines de Takemoto, Uchicawa y Uchida(223), y sobre todo

de Menta (91), véase el estudio comparativo de los cementos PY-6/D, O, A, C y M 70/30 con 7,0% y 21,0% de  $\text{SO}_3$ , respectivamente de la POP. Siendo todo ello aplicable a los apartados correspondientes del método ASTM C 452, VIII.2.2.3, e H-1, VIII.3.3.2.1

6º.- El razonamiento del punto anterior, tal cual, daría pie a poder decir que los resultados que se obtendrían en cada caso y momento concreto del ensayo no son sino la suma algebraica de los efectos expansivos inherentes a las cantidades respectivas de cada tipo de ettringita formada en cada uno de ellos. Y eso, como se puede ver, no ha ocurrido de una manera tan simplista, de aquí la necesidad de una interpretación lo menos general y mas concreta posible de cada caso específico.

Por lo tanto continuando con la generalidad marcada en los puntos anteriores de la posible presencia conjunta, en su caso, a todas las edades del ensayo y en especial a las iniciales de ambos tipos de ettringitas, ett-rf y ett-lf se ha de destacar el hecho muy llamativo de que a igualdad de cemento de mezcla los valores alcanzados de todos los parámetros en cada torta cuando el  $\text{C}_3\text{A}$  está presente en alguna medida, son muy superiores a los que se alcanzan cuando:

- a) dicho  $\text{C}_3\text{A}$  está ausente, caso de las tortas de los correspondientes cementos de mezcla preparados con el PY-4 ó PY-6, ó
- b) se trata del propio cemento portland matriz acompañante correspondiente solo, caso del P-1, P-2, P-31, P-5 ó PY-1, véase Tabla 17, aumentando por lo general tal diferencia con la adición de puzolana M.

Pues bien, una razón posible de ello es que, la génesis conjunta de ambas ettringitas, en particular las 1<sup>ria</sup>s, ha de originar una potenciación conjunta de sus efectos expansivos correspondientes, SINERGISMO ó "acción sinérgica", en especial los de la ett-rf 1<sup>ria</sup>, debiendo de ser por tanto mas espectaculares por su cuantía y rapidez los resultados obtenidos conforme mas ett-rf 1<sup>ria</sup> se origine (por eso se alcanzan valores de  $\Delta\emptyset$ , ( $\Delta h$ ),  $Vc\emptyset$  y PAV mas rapidamente, véase Tabla 22) y menos ett-lf 1<sup>ria</sup> le acompañe, pero sin llegar nunca a su nulidad absoluta. Pues si bien la menor Vf de esta última, junto a su menor cantidad de  $\text{C}_3\text{A}$  originario presente, aparentemente supondrían un freno para aquella, lo cierto es que se puede ver compensado por una



expansividad adicional coadyuvante en momento y forma, y con ello por una probable porosidad complementaria, que aunque mínima, debe de facilitar una mas rápida hidratación de la torta y por tanto de su  $Al_2O_3$  constitutivo y originario de la primera, o al contrario, lo cual puede ser lo mas verosímil dado que la consecución de tales tan espectaculares resultados  $\Delta\theta$ ,  $Vc\theta$  y PAV a dichas edades iniciales, ha sido siempre en todas las tortas 60/40 y algunas hermanas 70/30, y no en las 80/20 también hermanas correspondientes; aunque no obstante los de las mismas han sido aún apreciables, si el cemento de mezcla PA 80/20 constitutivo de la torta, posee  $C_3A$ , caso del P-1/M 80/20 y P-2/M 80/20, que si no lo posee, caso del PY-4/M 80/20 y PY-6/M 80/20, confirmando ello mismo así como también su similar en orden de magnitud, la menor acción sinérgica habida en todos ellos respecto a la de sus tortas hermanas 70/30 y 60/40 respectivas, y menor aún por idéntico motivo en las de estos dos últimos citados PY-4/M 80/20 y PY-6/M 80/20. Ello se vé confirmado además por lo dicho al respecto en la interpretación VIII.2.2.2.3 (E)(F), 2ª venidera (ASTM C 452-68).

Todo ello sin olvidar además la posibilidad adicional complementaria ó no a la hipótesis anterior, consistente en que debido a la extraordinaria acción puzolánica de la puzolana M, ésta originaría una bajao o escasa  $[CaC]$  permanente ( $[CaO] < \text{saturación}$ ) en la fase líquida correspondiente durante las edades iniciales del ensayo de 1 a 7 días ó 28 días inclusive, como así ha sido caso, véase figura 4, lo cual permitiría una hidratación y solubilización continuada y también permanente del  $C_3A$  acompañante que de esta manera y durante tales edades iniciales del ensayo pasaría en su mayor parte a  $et-lf$  <sup>líquida</sup>, fijando gran cantidad del yeso puestole como agresivo (ello haría que la  $SO_4^{2-}$  <sub>1cp</sub> en el ensayo ASTM C 452-68 debiera ser de las menores de todas las puzolanas ensavadas y comparadas, como así ha sido el caso, véase la Tabla 54), provocando idénticos o parecidos efectos a los citados en la hipótesis anterior. En tal caso ello daría dié a pensar con fundamento que el mecanismo de formación de la ettringita en el supuesto de ser como parece el topoquímico debiera de ser con disolución previa.

79.1.- Tortas cuyo cemento portland matriz acompañante correspondiente no aporta  $C_3A$ , caso del PY-4 y el PY-6:

79.1.1.- A edades iniciales:

79.1.1.1.- Cementos de mezcla 80/20: En este caso basta continuar con la explicación que se venía dando en el punto 69. Según ella, en el caso de que la presencia de  $C_3A$  se minimice hasta su nulidad, el efecto coadyuvante citado de dicho  $C_3A$  debe de desaparecer, por lo que los correspondientes valores que se alcancen en igualdad de condiciones, de tales parámetros, deben de ser bastante menores que cuando estuvo aquél presente en el caso de que el cemento portland matriz acompañante P ó PY lo aportara, como así ha ocurrido en este trabajo.

Además y puesto que tal diferencia de valores alcanzados en ambos casos, de que esté, ó no, el  $C_3A$  presente, podría calificarse de muy notable, cabe pensar en la posibilidad adicional de que como la ausencia de  $C_3A$  suele llevar aparejado comunmente en tales cementos PY, una mayor presencia

de  $C_3S$  y/o  $C_2S$  y/o  $C_4AF$  (en especial primero y último) y por tanto en sus tortas correspondientes, éstos al hidratarse podrían y pueden, provocar un efecto endurecedor de aquéllos, que podría ser contrario al expansivo derivado de la formación de  $ett-rf\ I^{ria}$ , y que disminuiría con la ausencia de los mismos, es decir, con el aumento o presencia de puzolana M. Con lo que esta hipótesis posible daría a estas edades iniciales menores  $\Delta \emptyset$  ( $\Delta h$ ) y  $Vc\emptyset$  en las tortas 20/20, y al contrario en sus hermanas 60/40, aunque todos ellos habrían de estar dentro de la tónica común antes citada de ser siempre menores, en cualquier caso, a sus homónimos con  $C_3A$ , como así ha ocurrido en este trabajo, véase Tabla 22.

Por otra parte en cuanto a la causa posible de la nulidad alcanzada en los correspondientes valores del PAV en todas estas tortas, señal inequívoca de su fraguado -nada extraño por otra parte dada la presencia notable en las mismas del  $C_3S$  y/o  $C_2S$  y/o  $C_4AF$  antes citado-. cabe pensar en la posibilidad de que la Vf de la  $ett-rf\ I^{ria}$  pueda ser también, en ciertas circunstancias, mayor que la velocidad de fraguado de la torta, por lo que dicho fraguado iría, en cierto modo, "ganándose" poco a poco para su fin a toda, ó solo parte, según los casos, de la  $ett-rf\ I^{ria}$  previamente formada prácticamente en exclusiva en este caso, y que por tal motivo para entonces, deberá de haber desarrollado proporcionalmente su expansividad característica, y nocividad en su caso.

De donde se infiere por tanto que la  $ett-rf\ I^{ria}$  ya formada "no se debe oponer a dicho 'fraguado'" y todo lo que sea no oponerse, podría muy bien interpretarse en estos sistemas tan selenitosos, como colaborar y/o participar en él y con él aunque si no de forma directa, por ser quizás algo distintas sus velocidades respectivas, si al menos de forma indirecta, merced a la porosidad gradativa,

superior a la inicial de la torta, inherente a la expansividad connatural de aquella, la cual por escasa que fuese, caso de estas tortas 80/20, facilitará siempre y proporcionalmente una mayor y mas pronta humectación e hidratación subsiguiente de los mismos  $-C_3S$  y/o  $C_2S$  y/o  $C_4AF-$  y con ellos de la torta y su fraguado.

Y entrando aún mas en detalle en este caso, la causa probable por la que las tortas 80/20 y 70/30 preparadas con el cemento portland matriz PY-6 y puzolana M dan menores  $\Delta \emptyset$  que las correspondientes al PY-4, puede estribar en que al tener el cemento PY-6 mucho  $C_3S$  el efecto endurecedor del mismo como se ha dicho, debe de suponer un mayor freno al efecto expansivo de su fracción M acompañante respectiva. Esto se ve además confirmado por la correspondiente torta 60/40 que se comporta al revés probablemente debido a que, en valor absoluto, su fracción de  $C_3S$  del PY-6 matriz acompañante ya no es la suficiente para "influenciar" a la torta respectiva con su endurecimiento característico, aunque si puede seguir siendo quizás la necesaria para producir mayor cantidad de portlandita en su hidratación, para facilitar una mayor síntesis de ettringita expansiva (pero ya para entonces quizás de origen ión  $Al^{3+}$  del  $C_4AF$  y sus s.s. del mismo), como lo confirman los resultados correspondientes del ensayo de Fratini, véase Fig. 4.

7<sup>o</sup>.1.1.2.- Cementos de mezcla 60/40: La hipótesis dada últimamente para las tortas de los cementos de mezcla 80/20 correspondientes, se vé igualmente confirmada en este caso, sin mas que echar un vistazo a los valores del PAV alcanzados a tales edades iniciales en todas las tortas 60/40 de esta parte del trabajo, tengan, ó no,  $C_3A$ , los cuales van disminuyendo gradativamente por lo general con la disminución del contenido de  $C_3A$  de la torta (o sea, con la disminución del contenido de  $C_3A$  de su cemento matriz acompañante correspondiente P ó PY), indu-

ciendo ello a pensar en la participación en los mismos, de dicho  $C_3A$ . De aquí que en el caso de que éste se encuentre ausente en aquellos (como es -- el presente interpretado), se deberá alcanzar la disminución máxima o nulidad, de tales valores del PAV en las mismas, que bien pueden permanecer constantes a lo largo del ensayo, al no tener que aparecer durante el mismo expansividad alguna, ni por ataque sulfático, ni por carbonatación de portlandita excedentaria, como ha ocurrido en esta parte del trabajo.

Por lo tanto en este caso no deberá ocurrir lo mismo que en sus tortas hermanas 80/20, pues al ser aquí la ettringita la que participe en mayor medida en todos los casos en la ettringita total a formar, ésta, a igualdad de tiempo, se deberá formar mas rápidamente (véase a propósito que en cualquier familia, la  $Vc\emptyset$  de su torta 60/40 es la máxima de las tres), debiéndose finalizar por tanto su formación, así como la presencia del  $Al_2O_3^+$  de la puzolana M en la torta, mas prontamente.

De aquí que al deberse originar, al parecer, dicha ettringita total a una velocidad mayor (dada la mayor  $Vc\emptyset$  alcanzada en todas las tortas de este tipo), a la de fraguado (menor en este caso del P-1/M 60/40 al ser menores que en la torta hermana 80/20 los contenidos correspondientes de  $C_3S$  y/o  $C_2S$  y/o  $C_4AF$  endurecedores y  $C_3A$  o no endurecedores para formar ettringita expansiva):

1º.- Puede aumentar, de origen la porosidad del sistema, (no fraguado íntegramente aún), facilitando con ello la hidratación selenitosa del resto de los componentes mineralógicos que le acompañan y en especial el  $C_3A$ , en su caso, que podrá formar antes por esta causa, aunque a su velocidad característica, toda la ettringita que puede ser capaz, quizás ya  $2^{ria}$ , pero no a edades tardías, aunque no obstante su fraguado lento lo

será mas aún conforme mas  $C_3A$  tenga su cemento portland matriz acompañante correspondiente, como ha ocurrido en este trabajo.

2º.- Puede no ser de resultados tan nocivos pese a su ya clásica expansividad, pues véase que pese a originar los mas espectaculares y rápidos  $\Delta \emptyset$  ( $\Delta h$ ) y  $Vc\emptyset$ , éstos son, de entre todos, 80/20 y 70/30, los que aproximadamente guardan mas la constancia a lo largo del ensayo, de aquí que su  $Vc\emptyset$  se minimice y haga constante mas rápidamente, lo cual se traduce en una tendencia a la estabilidad de volúmen a lo largo del ensayo confirmable por la disminución, ó mejor constancia de nulidad durante el transcurso del ensayo, del PAV correspondiente, véase Fot. 1, y Tabla 21, y

3º.- Puede colaborar en cierta medida en el fraguado inicial o gradativo de la misma (véase lo dicho anteriormente sobre el PAV que así lo confirma) como así ha ocurrido en este trabajo.

Por último las causas posibles de las diferencias de  $\Delta \emptyset_{1d}$  entre las tortas PY-4/M 60/40 y PY-6/M 60/40 - véanse al final del punto 4º de la presente interpretación.

7º.1.1.3.- Cementos de mezcla 70/30: La hipótesis explicativa del comportamiento de sus tortas correspondientes habrá de estar comprendida forzosamente entre las dos últimas dadas de sus tortas hermanas 80/20 y 60/40.

7º.1.2.- A edades finales, de 365, 545 y 730 días :

7º.1.2.1.- Cementos de mezcla 80/20: Lo ocurrido en sus tortas respectivas probablemente se deba a :

- o bien que en tales casos al producirse como siempre el fraguado de la torta de fuera a dentro y verificarse la misma con formación previa de ettringita ria de origen  $Al_2O_3^-$  de la zona mas externa de la torta, seguida de la hidratación subsiguiente de sus  $C_3S$  y/o  $C_2S$  y/o  $C_4AF$  acompañantes, éstos empezarán a fraguar dicha parte externa impidiendo con ello el progreso de la humectación e hidratación selenitosa subsiguientes del resto de los materiales, aún

posiblemente anhidros, de su zona mas interna, que quedarían así "aprisionados" en la misma, con lo que de este modo se estarían gestando los condicionantes necesarios para que con posterioridad reaccionen, pero en potencia, violentamente dada la gran Vf de la ett-rf expansiva; con lo que, en un cierto sentido, la  $Al_2O_3^{r-}$  residual aún anhídrica de las zonas mas internas de la torta endurecida, actuarían, por pequeña que fuese al pasar a ett-rf  $2^{ria}$ , a modo de una auténtica y verdadera "cuña interna" (resquebrajadora de aquella), ante un entorno tan endurecido.

Ello lo viene a confirmar el hecho de que en el caso de las tortas 80/20 el número total de fracturas por  $cm^2$  deberá ser menor y mas profundas que en el caso de las de sus hermanas respectivas 70/30, y el de éstas menor que el de las 60/40 hermanas, véase Fot. 1, las cuales por tal razón habrán de dar mayores valores de  $\Delta \emptyset$  ( $\Delta h$ ), y  $Vc\emptyset$  y parecidos máximos del PAV, como así ha ocurrido en este trabajo. Y a igualdad de cemento de mezcla, menores conforme mayor oposición se ofrezca (por estar mas fraguadas al tener mas  $C_3S$ ) al efecto expansivo común, tardándose mas tiempo en alcanzar, en tal caso, el máximo valor del PAV, como así también ha ocurrido en este trabajo,

- o bien, porque en tales tortas, el exceso de  $C_3S$  y/o  $C_2S$  y/o  $C_4AF$  (principalmente primero y último) característico del PY-4 ó PY-6 que las conforma lleva implícito en su hidratación una mayor liberación de portlandita con sus posibles consecuencias expansoras por carbonatación. A tal efecto, obsérvese como todas las fracturas de tales tortas poseen un "halo" común de  $CO_3Ca$  sint. confirmado por análisis químico, que le contornea externamente los bordes al igual que ocurre en las correspondientes a su cemento portland matriz acompañante respectivo solo,

Fot. 1. No obstante la participación de este fenómeno expansivo parece no ser exclusiva ni mayoritariamente, puesto que según ello las tortas que más  $A\emptyset$  deberían de haber originado serían las 80/20 y después las 70/30, en especial en las del PY-6 por tener mas  $C_3S$  que el resto, y ha ocurrido todo lo contrario en ambos casos, por lo tanto ello descarta en gran medida esta posibilidad exclusivista y/o mayoritaria,

- o bien por formación de ettringita de origen  $Al^{3+}$  del  $C_4AF$  y sus s.s., a la que se podría llamar quizás ettringita de "muy lenta velocidad de formación" para diferenciarla del resto, y lógicamente, 2<sup>ria</sup>,

- o bien por ambas posibilidades anteriores, en mayor o menor medida.

7<sup>a</sup>.1.2.2.- Cementos de mezcla 60/40: La causa por la que sus tortas respectivas suelen guardar de origen, una mayor constancia morfológica, probablemente estíbe:

- o bien, porque no haya suficiente portlandita en el medio para permitir la formación rápida de la ettringita posible, lo cual es bastante improbable especialmente para el caso de la torta cuyo cemento portland matriz acompañante es el PY-6, que al tener casi todos los silicatos anhidros como  $C_3S$  (79,43%), deberá aportar desde el origen mayor cantidad de portlandita (véase Fig. 4) y mayor fraguado inicial de aquella, lo cual se deberá traducir finalmente en un mayor efecto expansivo resultante del choque máximo habido en ella "efecto endurecedor-máxima expansividad por ettringita total inicialmente formada", de aquí que en este caso la  $Vc\emptyset$  sea mayor y el PAV aumente mas pronto,, como así ha ocurrido en este trabajo,

- o bien, porque por dicho contenido elevado de  $C_3S$ , le puede ser también aplicable en parte el razonamiento dado para su torta hermana 80/20, con lo cual le ocurriría, aunque menos, el efecto de

"cuña interna" citado antes, de aquí que la PAV deba ser menor que el de aquella y su máximo valor correspondiente se tenga que alcanzar algo mas tardíamente, para a continuación tender hacia su fraguado lento y progresivo mucho antes; el cual podría ser inclusive nulo de origen en el caso de que el efecto endurecedor inicial anterior no fuera tan acusado y si algo menor, por menor contenido de  $C_3S$  del cemento portland matriz acompañante correspondiente, como es el caso del PY-4; pudiendo ser también la formación de  $ett-rf$  <sup>ria</sup> en este caso muy elevada, por no decir total, y que participaría por consiguiente de dicho fraguado inicial, proporcionando de este modo un valor de PAV inicial nulo, como así ha ocurrido en este trabajo,

- o bien, porque el material constitutivo de la torta, se encuentre en estequiometría perfecta ó similar, en cuyo caso tal formación de  $ett-rf$  no se opone ó mejor participa de algún modo en el fraguado inicial de la torta, lo cual se ve confirmado por los valores nulos de origen, ó no, pero progresivamente decrecientes del PAV, como así ha ocurrido en este trabajo,
- o bien, por tales posibilidades anteriores en mayor o menor medida.

7<sup>º</sup>.1.2.3.- Cementos de mezcla 70/30: Al encontrarse sus tortas respectivas entre sus hermanas 80/20 y 60/40 correspondientes, de algún modo deben de participar en mayor o menor medida de los razonamientos correspondientes anteriores dados para ellas.

7<sup>º</sup>.1.3.- A edades intermedias : Por producirse durante las mismas el paso gradativo de lo ocurrido a las iniciales y finales correspondientes antes citadas, deberá participar en mayor o menor medida de sus interpretaciones respectivas dadas anteriormente.

7<sup>º</sup>.2.- Tortas cuyo cemento portland matriz constitutivo aporte  $C_3A$ , caso del P-1, P-2, P-31, P-5 y/o PY-1:



7<sup>o</sup>.2.1.- A edades iniciales:

7<sup>o</sup>.2.1.1.- Cementos de mezcla 80/20: En este caso vale el mismo proceso explicativo dado para el caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente no aportara  $C_3A$ , con la única y fundamental diferencia de que mientras en aquél el proceso de hidratación de la torta de fuera a dentro, va precedido del fraguado de la misma, el cual dificulta su progreso, en éste, al estar presente el  $C_3A$  ha de ocurrir todo lo contrario, es decir, que durante todo el ensayo, tanto la  $ett-rf$   $1^{ria}$  como  $2^{ria}$  se ven potenciadas en su proceso expansivo por la  $ett-lf$   $1^{ria}$  y  $2^{ria}$  respectivas correspondientes. De aquí que su mayor parte se deba de formar siempre antes y, en especial, a edades iniciales y viceversa. Por lo tanto a mas cantidad de  $C_3A$  esté presente, menor oposición anti-expansora o endurecedora habrá, y mayor y mas pronto reblandecimiento del sistema (observese que en caso mas favorable torta P-1/M 80/20 se alcanza a los 28 días contra los 365 días en el resto de tortas hermanas), cuyas posteriores expansiones las podrá amortiguar mas facilmente y viceversa. De aquí que, por lo general, los  $\Delta\theta$  y  $V_{c\theta}$  aumenten y el PAV disminuya con la disminución del  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante correspondiente, pues de este modo menos podrá amortiguar el sistema, como se ha dicho (por estar mas fraguado), las expansiones posteriores, siendo por tanto mas sensible a las mismas, en forma de fracturación, que no de reblandecimiento, o bien reblandecimiento mucho mas tardío, de aquí que el PAV aumente en el resto de las tortas mas lentamente como así ha ocurrido en este trabajo.

7<sup>o</sup>.2.1.2.- Cementos de mezcla 60/40: Para explicar lo ocurrido en las tortas de estos cementos de mezcla son válidos:

- a) la explicación dada en la interpretación 6<sup>a</sup>, y
- b) la explicación dada anteriormente para las tortas hermanas 80/20

Pues según la primera, en estas tortas 60/40 se debe originar la máxima potenciación de los efectos

expansivos de ambos tipos de ettringitas de donde se infiere que se deban de alcanzar en las mismas los máximos valores de  $\Delta\emptyset$ , ( $\Delta h$ ) y  $Vc\emptyset$ , como así ha ocurrido en este trabajo. Y según la segunda, dichos máximos valores citados deberán aumentar con la disminución de  $C_3A$  de su cemento portland matriz acompañante correspondiente, así como que los correspondientes valores del PAV deberán ser elevados de origen, tanto más conforme más  $C_3A$  tenga el cemento portland matriz acompañante correspondiente, como así también ha ocurrido en este trabajo.

7<sup>o</sup>.2.1.3.- Cementos de mezcla 70/30: Al encontrarse sus tortas respectivas entre sus hermanas 80/20 y 60/40 correspondientes, de algún modo deben de participar en mayor o menor medida de sus razonamientos anteriores respectivos.

7<sup>o</sup>.2.2.- A edades intermedias :

7<sup>o</sup>.2.2.1.- Cementos de mezcla 80/20: El comportamiento de sus tortas correspondientes probablemente se debe al hecho ya apuntado anteriormente de la presencia en las mismas del  $C_3A$  y  $Al_2O_3^{r-}$  residuales que darán respectivamente ett-lf y ett-rf, ya  $2^{ria}$ , pero mayormente la primera, por su menor velocidad de formación y mayor cuantía a tales edades intermedias de su reactivo originario,  $C_3A$ , las cuales harán que,

- o bien continúe sin dureza alguna la torta, conforme transcurre el ensayo, si hay suficiente  $C_3A$ , con lo cual sus  $\Delta\emptyset$  ( $\Delta h$ ) y  $Vc\emptyset$  no serán los mayores por amortiguación de su causa expansora y su PAV continuará siendo máximo, como así ha ocurrido en este trabajo,

- o bien al tener menos  $C_3A$ , pueda permanecer algo mas fraguada dicha torta durante algún tiempo, sinónimo de expansiones mayores al haber mayor "oposición endurecedora", y cuyos valores del PAV irán elevándose con la edad del ensayo probablemente hasta llegar a alcanzar mas adelante, 365 días, su máximo correspondiente, como así también ha ocurrido en este trabajo,

- o bien por ambas posibilidades anteriores en mayor o menor medida.

7<sup>o</sup>.2.2.2.- Cementos de mezcla 60/40: El comportamiento de sus tortas correspondientes probablemente se deba al hecho de que al ser menor en todas ellas su cantidad de  $C_3A$  y por tanto su cantidad total de  $ett-lf$   $2^{ria}$  correspondiente, ésta tardará menos tiempo en alcanzar su total formación, y como para entonces la  $ett-rf$   $1^{ria}$  y  $2^{ria}$  ya deberán haber terminado de formarse, a partir de ese instante habrá cesado cualquier causa expansora debida a ataque sulfúrico, que unida a la menor cantidad de portlandita del medio dará con el endurecimiento continuado, aunque lento, de todo el conjunto (de aquí que su PAV disminuya lentamente), y de este modo con la mayor estabilidad de volumen de la probeta y sus características dimensionales  $\Delta \emptyset$ ,  $(\Delta h)$  y  $Vc\emptyset$ , como así ha ocurrido en este trabajo.

7<sup>o</sup>.2.2.3.- Cementos de mezcla 70/30: Al encontrarse sus tortas respectivas entre sus hermanas 80/20 y 60/40 correspondientes, de algún modo deben de participar en mayor o menor medida de los razonamientos correspondientes anteriores dados para las mismas.

7<sup>o</sup>.2.3.- A edades finales:

Obsérvese que en general existe una tendencia endurecedora de la pasta selenitosa sea cual fuere la torta 80/20, 70/30, 60/40,

- a) bien porque habiendo sido máximo su PAV desde la edad de 28 ó 90 días comienza a disminuir, caso del P-1/M 80/20, ó 70/30 ó 60/40, hasta final del ensayo,
- b) bien porque habiendo alcanzado gradativamente su máximo valor del PAV a los 365 días, éste comienza, a partir de entonces a disminuir hasta final del ensayo, caso del resto de las tortas 80/20 ó 70/30,
- c) bien porque habiendo sido elevado, en las edades iniciales va disminuyendo gradativamente conforme transcurre el ensayo, siendo por lo general el mínimo alcanzado en todos los casos,

lo cual unido a que tales disminuciones del PAV suelen acompañarse de un colapso de la torta con ligera disminución de sus dimensiones, hace pensar en la posibilidad de que para entonces la causa que mucho antes o hasta ese momento le hacia expandir, muy probablemente por ataque selenitoso, ha cesado, tornándose en otro proceso distinto que muy bien pudiera ser la carbonatación de la portlandita residual del sistema aún existente en el mismo, la cual,

- sería expansiva y nociva en el caso de que la torta estuviera ya muy fraguada, como ha sido el caso de las tortas de cemento portland matriz PY solo, y quizás también proporcionalmente las de sus cementos de mezcla respectivos 80/20 y 70/30 con esta puzolana "I", ¿
- sería expansiva y no nociva, por colmar un sistema previamente "esponjado" por el ataque selenitoso previo, como ha podido ser el caso del resto de las tortas de cemento portland matriz acompañante correspondiente de contenido mediano y alto de C.A.

De la Discusión 2ª: De las interpretaciones dadas a las discusiones 2ª y 3ª anteriores, se deduce que,

la Ettringita TOTAL a formar  $\leftarrow XSO_4Ca.2H_2O + n_1^+Al_2O_3^{r-} + n_2^+C_3A + Y H_2O$   
 (de puz.M) (de cem.P)

donde:

$$X = \text{constante} = \frac{23,33\%}{\text{Pm SO}_4 \text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}} = \text{constante}$$

$n_1^0$ , puede ser  $\Rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{- constante, a igualda de cemento de mezcla, ó} \\ \text{- variable, de un cemento de mezcla a otro dentro de} \\ \text{una misma familia} \end{array} \right.$

$n_2^*$  = variable, tanto a igualdad de cemento de mezcla (puesto que los cementos matrices acompañantes respectivos posibles son de distinto contenido de  $C_3A$ ), como de un cemento de mezcla a otro, dentro de una misma familia.

por lo tanto, dentro de una misma familia de cementos de mezcla, donde la superficie específica de ambos componentes respectivos, fracción de cemento portland matriz P ó PY y fracción puzolana M, se mantiene constante de un cemento a otro hermano, se tendrá que cumplir que, de origen, el  $\Delta \phi$  y  $V_{c\phi}$  de las tortas respectivas han

de aumentar con la adición de puzolana M, es decir, de  $Al_2O_3^+$ , y disminuir con la disminución de cemento portland matriz acompañante, es decir, de  $C_3A$ ; en definitiva, que en todas las familias de cementos de mezcla a la edad de 1 día, el  $\Delta 0$  y  $Vc0$  de las tortas respectivas habrán de aumentar del 80/20 al 60/40 pasando por el 70/30 en dicho orden, como así ha ocurrido en este trabajo.

Ahora bien, al hacer constante también la fracción de puzolana M añadida, o sea,  $Al_2O_3^+$  = cte., es decir, a igualdad de cemento de mezcla, se hace obligatoriamente variable la cantidad de  $C_3A$  aportada por la fracción de cemento portland matriz acompañante respectivo, por lo que la  $ett-T$  a formar inicialmente será función directa solamente de dicha cantidad de  $C_3A$  variable, es decir,  $ett-T = f(n_2^2 C_3A)$ , luego a mas  $C_3A$  posea el cemento portland matriz acompañante - siendo todos ellos de igual superficie específica, contenidos de  $C_3S$  y  $C_2S$ , cristalinidad, etc. (propiedades tecnológicas prácticamente imposibles de conseguir)-, mayor  $\Delta 0$  y  $Vc0$  se deberá originar inicialmente, y eso no ha ocurrido en este trabajo, luego la causa ha de estribar obligatoriamente en el distinto tamaño y forma de grano (superficie específica, Tabla 11), grado de cristalinidad y/o vitriedad, etc., de cada uno de ellos, las cuales lógicamente han de ser diferentes por proceder de fábricas nacionales distintas.

Y ello se ve confirmado por el hecho de que esa misma causa deberá dejar de serlo conforme transcurra la hidratación selenitosa total de cada torta y todas las moléculas de  $C_3A$  de los granos de la fracción cemento portland matriz acompañante respectivo hayan pasado a  $ett-lf$ . Por lo tanto la generalidad anteriormente citada, que en el inicio de la hidratación selenitosa debiera cumplirse y no se cumple, por la razón aludida, deberá hacerlo conforme transcurre el ensayo, como así ha sucedido en este trabajo, véase Tabla 22.

Por último y antes de finalizar esta interpretación VIII.1.2.2.2 se ha de decir por tanto que según este método acelerado de ensayo de L-A, (y los métodos ASTM C 452 e h-1 que se verán mas adelante), TODOS los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con la puzolana referencial aluminica M, han mostrado por uno u otro motivo, un grado de RS MENOR que el de su cemento portland matriz conformante respectivo, P ó PY, solo, puesto que tarde o temprano, pero mas bien esto último, el valor del  $\Delta\phi$  (ó del  $\Delta L$ ) correspondiente a la torta (ó probetas) de aquellos, ha resultado ser superior al de este último, manteniéndose de este modo durante tanto mas tiempo cuanto mayor ha sido el contenido de  $SO_3$  del método acelerado de ensayo empleado, L-A e H-A, y viceversa ASTM C 452, y menor el contenido de aquél, y viceversa; y hasta tal punto, que todos los cementos portland matrices acompañantes PY, definidos como se véra como de elevada RS por los tres métodos acelerados de ensayo empleados, dejaron de serlo para pasar a ser o bien de moderada o bien de escasa RS, puesto que el  $\Delta\phi_{28d.}$  de su(s) torta(s) correspondientes, superó el valor

- . del 1,25% ó del 4,00% en el método L-A,
- (. del 0,054% ó del 0,073% en el método ASTM C 452, y
- . del 0,044% ó del 0,095% en el método h-1, los cuales se verán mas adelante).

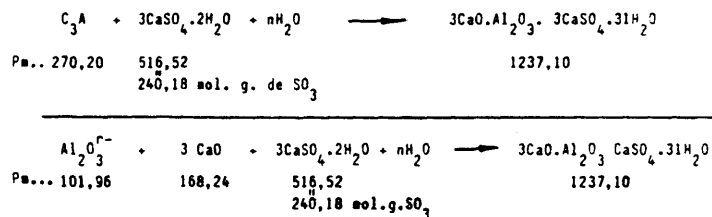
NOTA:

Cálculos estequiométricos: Obtención de ettringita a partir de  $C_3A$  y  $Al_2O_3^{R-}$  en los cementos de mezcla P-1/M 80/20, 70/30 y 60/40.

Consideraciones Previas

1ª.- La puzolana M empleada en este trabajo al tener como mínimo un 50,35% de riqueza, portará un  $2,08 \times 0,5035 = 1,0472\% Al_2O_3^{R-}$ .

Cemento	P-1; $C_3A=14,11\%$ , podría originar	54,60% ett-lf
$0,9 \times 14,11 = 11,288\% C_3A$	aportado por cent. P-1 al cent. mezcla P-1/M80/20 pod.orig.	51,58% ett-lf
$0,7 \times 14,11 = 9,877\% C_3A$	" " " " " " " " P-1/M70/30 " " "	45,22% "
$0,6 \times 14,11 = 8,466\% C_3A$	" " " " " " " " P-1/M60/40 " " "	38,76% "
$0,2 \times 1,0472 = 0,2095\% Al_2O_3^{R-}$	" " " " " " " " puzol. M " " "	2,54% "
$0,3 \times 1,0472 = 0,3142\% Al_2O_3^{R-}$	" " " " " " " " " " " " "	3,81% "
$0,4 \times 1,0472 = 0,4189\% Al_2O_3^{R-}$	" " " " " " " " " " " " "	5,08% "



VIII.1.2.2.3.- Cementos de Mezcla preparados con las puzolanas industriales O, A y C, y CV-10 y CV-19. Estudio Comparativo con las puzolanas referenciales D y M, véanse Tablas 19 21, 24 y 26.

Dado que en este caso los valores obtenidos de los parámetros  $\Delta\emptyset$ ,  $Vc\emptyset$  y PAV de todas las tortas preparadas con cada una de las puzolanas anteriores han tenido oscilaciones múltiples y diversas a lo largo de todo el ensayo, se ha creído conveniente y oportuno el estudiarlos de una manera individualizada al objeto de su más cómoda interpretación. A tal fin se han hecho dos agrupaciones con los mismos, la de los parámetros afines  $\Delta\emptyset$  y  $Vc\emptyset$  por un lado y la del parámetro PAV por otro.

Discusión VIII.1.2.2.3. (E)

(E) Parámetros:  $\Delta\emptyset$  y  $Vc\emptyset$ .

1ª.- En todas las tortas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados al efecto con cada una de estas puzolanas O, A y C respectivamente, la evolución de los valores del  $\Delta\emptyset$  y  $Vc\emptyset$  correspondientes, ha sido,

- $\Delta\emptyset$ , de aumento por lo general, grande, mediano o pequeño hinchamiento con resquebrajamiento mas o menos acusado de la torta, que llega a dar, mas pronto ó mas tarde, con su destrucción total ó parcial, pero que una vez alcanzado, en su caso, el máximo valor del  $\Delta\emptyset$ , la torta colapsa tendiendo a fraguar muy lentamente, como se verá mas adelante por los valores del PAV correspondientes; todo ello según la puzolana y/o el cemento portland matriz P ó PY que la acompañe en cada caso,
- $Vc\emptyset$ , de disminución rápida a lo sumo muy apreciable hasta la práctica nulidad de la misma, según los casos, pero con el hecho notable y destacable en todos ellos, de que sea cual fuere la torta del cemento de mezcla de que se trate, sus mayores valores de  $Vc\emptyset$ , alcanzados por la misma, se consiguen durante los primeros 28 días, y mas aún se podría precisar, que en ocasiones, dentro de sus primeras 24 horas, el cual va seguido, por lo general, en tales ocasiones, de una disminución también muy notable que es mas brusca que la de su cemento portland matriz acompañante P ó PY solo.

2ª.- Al fenómeno expansivo ocurrido a las primeras edades a las tortas preparadas con las puzolanas D y M, referente a que el  $\Delta\emptyset$  a la

edad de 1 día aumenta por lo general con la cantidad de puzolana añadida, ya se hizo mención en sus apartados correspondientes.

No obstante, únicamente se desea resaltar que mientras en la primera (puzolana D), la causa originaria es de tipo físico-químico -  $\Delta\emptyset = f$  (hidratación de  $C_3A$ ), hidratación de  $C_3A = f$  - (porosidad), y porosidad =  $f$  (cantidad de puzolana D)-, en la segunda, la M, la causa originaria es puramente de tipo químico -  $\Delta\emptyset = f$  ( $Al_2O_3^{F-}$ ) y  $Al_2O_3^{F-} = f$  (cantidad de puzolana M)-

3\*.- Se ha de destacar que, aparte de si los cementos de mezcla ensayados, según este método de ensayo L-A, son de elevada, o no, RS, las mediciones realizadas en los mismos a lo largo del ensayo que dieron, a igualdad de edad,

- un  $\Delta\emptyset$  mayor que el correspondiente a su cemento portland matriz constitutivo solo y/o
- un  $\Delta\emptyset$  mayor que el 80% ó 70% ó 60%, respectivamente del  $\Delta\emptyset$  de su cemento portland matriz constitutivo solo,

fueron aproximadamente las siguientes,

- el 38%,  $(\frac{35,83\% + 40,00\%}{2})$ , de un total de 91 y  
el 54%,  $(\frac{47,5\% + 60,00\%}{2})$ , respectivamente, de un total de 129,  
caso de que el cemento portland matriz constitutivo fuera de elevado contenido de  $C_3A$ , y
- el 70%,  $(\frac{83,70\% + 55,80\%}{2})$ , de un total de 145, y  
el 74%,  $(\frac{88,46\% + 59,62\%}{2})$ , respectivamente, de un total de 152,  
caso de que el cemento portland matriz constitutivo fuera de nulo contenido de  $C_3A$ .

4\*.- Como consecuencia de la discusión anterior surge pues que el comportamiento de las puzolanas, O, A, C, CV-10 y CV-19, es intermedio entre las dos anteriores referenciales, silícica D y aluminica M. No obstante, entrando en algo mas de detalle se puede precisar que:

(a) A igualdad de puzolana:

- a.1. Caso de que el cemento portland acompañante haya sido el P-1 ó el P-2, ambos de contenido elevado de  $C_3A$ :  
Que todas las tortas de los cementos de mezcla prepa-



rados con el cemento matriz P-1 (14,11% C<sub>3</sub>A) y cada una de las puzolanas ensayadas, D, O, A, C ó M - ésta última sólo la 60/40 - han mostrado por lo general, de principio a fin del ensayo, unos  $\Delta\theta$  superiores a los correspondientes de los cementos de mezcla preparados con las mismas y el cemento matriz P-2 (11,09% C<sub>3</sub>A), es decir:

	P-1/D, O, A, C	80/20	>	P-2/D, O, A, C	80/20
> $\Delta\theta$ >	P-1/D, O, A, C	70/30	>	P-2/D, O, A, C	70/30
	P-1/D, O, A, C ó M	60/40	>	P-2/D, O, A, C ó M	60/40
< $\Delta\theta$ <	P-1/M	80/20 ó 70/30	<	P-2/M	80/20 ó 70/30

a.2. Caso de que el cemento portland matriz acompañante haya sido el PY-4 ó el PY-6 (ambos de contenido nulo de C<sub>3</sub>A): Que, en general, casi todas las tortas de los cementos de mezcla preparados con el cemento portland matriz PY-6 (0,00% C<sub>3</sub>A) y cada una de las puzolanas ensayadas D, O, A, C ó M, han mostrado, de principio a fin del ensayo, unos  $\Delta\theta$  superiores a los correspondientes de los cementos de mezcla preparados con las mismas y el cemento portland matriz PY-4 (0,00% C<sub>3</sub>A), excepto la 80/20 y 70/30 de la M que se comportaron al revés. Pero no obstante y en casi todos los casos, excepto en el de la puzolana M, ya visto cuando se estudió sola, con un orden de magnitud que es muchísimo menor que los correspondientes anteriores del cemento portland matriz acompañante P-1 ó P-2.

(b) A igualdad de cemento portland matriz acompañante P ó PY:

b.1. Caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente haya sido el P-1 (14,11% C<sub>3</sub>A) ó el P-2 (11,09% C<sub>3</sub>A):

b.1.1. Caso de la puzolana D sola: Ya visto en su apartado VIII.1.2.2.1.

Antes de continuar adelante y en vista de que esta discusión se refiere tanto al estudio individual como comparado de cada puzolana respecto a la afin, referencial o no, mas próxima, según la clasificación obtenida en la conclusión parcial VII.4.2, 3ª (POP), se ha de hacer saber que la misma se va a continuar referenciando en primer lugar la O respecto de la D, a continuación la A

respecto de la O, seguidamente, la A respecto de la C y M y por último la C respecto de la M. Por lo tanto y según ello se continúa del siguiente modo:

- b.1.2. Caso de la puzolana O respecto de la D: Con la puzolana O se cumple, por lo general, a lo largo de todo el ensayo, que el  $\Delta\phi$  y  $Vc\phi$  de la torta correspondiente a cada cemento de mezcla preparado con ella disminuye con la cantidad de la misma añadida (o sea, al igual que ocurrió en el caso de la puzolana D desde la edad de 90 días hasta el final del ensayo, 730 días), es decir que

> $\Delta\phi$ >	P-1 ó P-2/O; 80/20 > 70/30 > 60/40	p.f.e.
------------------	------------------------------------	--------

por lo tanto se puede decir que impera el efecto químico inverso de la sustitución física; de aquí que en una lejana pero cierta medida la puzolana O se aproxime en comportamiento a la D con tales cementos portland P-1 y P-2, aunque en este caso bastante mas como diluyente o dispersante que la D, y por tanto y en definitiva bastante mas como un INERTE<sub>RS</sub> que como tal puzolana, a diferencia de lo que ocurriera con la D, residiendo en su diferencia constitutiva con la misma el que continúe manteniendo su verdadera identidad, es decir, su notable mayor parentesco con el resto, A, C ó M, que con la D.

- b.1.3. Caso de la puzolana A respecto de la O: Se puede decir otro tanto corregido y aumentado a lo dicho para la O, lo cual viene a reafirmar la existencia entre ambas puzolanas del parentesco antes citado.

No obstante y en cualquier caso los resultados alcanzados de este estudio comparativo de ambas puzolanas mezcladas respectivamente o con cemento P-1 o con cemento P-2, viene a decir que 29 mediciones comparativas de un total de 48 realizadas, han dado que la puzolana O ha originado,

a igualdad de edad y cemento de mezcla, mayor  $\Delta\emptyset$  que la A, siendo tal mayoría más absoluta aún si cabe a edades iniciales de 1, 7 y 28 días, 15 mediciones de un total de 18. Y todo ello sin olvidar un cierto carácter de INERTE<sub>RS</sub> - de las mismas, dado su efecto diluyente a dispersante del cemento portland matriz P-1 ó P-2 que las acompañe en cada caso.

b.1.4. Caso de las puzolanas A, C y M : Antes de continuar se ha de hacer constar que estas tres puzolanas se refieren o discuten conjuntamente por haber tenido, en mayor o menor grado, como se verá, un comportamiento más parecido u homogéneo entre sí.

- A la edad de 1 día: Por lo general se cumple que el  $\Delta\emptyset$  y la  $Vc\emptyset$  de la torta correspondiente a cada cemento de mezcla preparado y ensayado con las mismas, aumenta con la cantidad de puzolana añadida, excepto los cementos de mezcla correspondientes a la familia P-2/A, es decir:

$\Delta\emptyset$	P-1/A, C ó M ; 80/20 < 70/30 < 60/40	a 1 día
	P-2/C ó M ; 80/20 < 70/30 < 60/40	a 1 día

por lo tanto se puede decir que impera, en casi todos ellos (menos en la excepción citada que ocurre lo contrario) el efecto químico directo de la sustitución física de cemento P-1 por puzolana A, C ó M, y de cemento P-2 por puzolana C ó M.

- Desde la edad de 7 hasta la de 180 días: A edades distintas, pero todas ellas comprendidas entre 7 y 180 días, se produce un cambio del sentido del crecimiento diametral, entre tortas hermanas o de la misma puzolana, produciéndose dicho cambio antes con la puzolana A, a los 7 días, que con la puzolana M, a los 180 días, y estando la puzolana C intermedia entre ambas,

- Desde la edad de 270 días hasta final del ensayo: Por lo general se cumple lo que ha ocurrido comúnmente con el resto de las puzolanas D y O, es decir que el  $\Delta\emptyset$  disminuye con la cantidad de puzolana presente añadida excepto la 70/30 de la familia P-1/C, es decir

> $\Delta\emptyset$ >	P-1/A ó M ;	80/20 > 70/30 > 60/40	p.f.e.
	P-1/C ;	80/20 > 60/40 > 70/30	
	P-2/A, C ó M ;	80/20 > 70/30 > 60/40	

por lo tanto se puede decir que, por lo general y con la excepción citada impera el efecto químico inverso de la sustitución física de cemento P-1 por puzolana A ó M y cemento P-2 por puzolana A, C ó M.

b.1.5. Caso de las puzolanas C y M :

- A la edad de 1 día: Se cumple que el  $\Delta\emptyset$  aumenta con la cantidad de puzolana añadida, es decir

> $\Delta\emptyset$ >	P-1 ó P-2/C ó M ;	80/20 > 70/30 > 60/40	a 1 día
-----------------------	-------------------	-----------------------	---------

- Al resto de las edades : La puzolana C no tiene un comportamiento similar a la M de tal modo que:

- . la torta del cemento de mezcla 80/20 se porta similarmente a la 60/40 de las puzolanas O y A, en las que impera el efecto químico directo de la sustitución física,
- . la torta del cemento de mezcla 60/40 se porta similarmente a las 80/20 de la puzolana M,
- . quedando finalmente la torta del cemento de mezcla 70/30 en medio de las dos anteriores.

b.1.6. Caso de la puzolana M: Véase la discusión 7ª e interpretación 7ª dadas en su apartado anterior correspondiente.

b.2. Caso de que el cemento portland matriz acompañante haya sido el PY-4 ó el PY-6 (ambos de nulo contenido de C<sub>3</sub>A)

b.2.1. Caso de las puzolanas D, O, A, C y M :

b.2.1.1<sup>a</sup> Hasta la edad de 7 días, extensible por lo general, hasta la de 180 días sólo para  $\Delta\emptyset$ : Excepto en la tortas de los cementos de mezcla preparados con la puzolana D, en las restantes preparadas con las puzolanas O, A, C ó M, el  $\Delta\emptyset$  y la  $Vc\emptyset$  (sólo hasta la edad de 28 días y 7 en ocasiones) es directamente proporcional a la cantidad de puzolana añadida, es decir

$<\Delta\emptyset>$	PY-4 ó PY-6/O, A, C ó M ; 80/20 < 70/30 < 60/40	de 1 a 180 d.
---------------------	---	---------------

Por lo tanto se puede decir con fundamento que impera el efecto químico directo de la sustitución física de cemento PY-4 ó PY-6 por puzolana.

No obstante en el caso concreto de la puzolana D y para la misma edad ocurre todo lo contrario.

b.2.1.2<sup>a</sup> Desde los 180 días de edad en adelante: A partir de esta edad en adelante y ya sólo para las puzolanas A (con el cemento PY-6), C y M (con el cemento PY-4 ó el cemento PY-6), ocurre todo lo contrario a lo dicho anteriormente, es decir, que el  $\Delta\emptyset$  y  $Vc\emptyset$  (ésta última de muy pequeño valor absoluto) disminuyen con la cantidad de puzolana añadida, o sea, impera el efecto químico inverso de la sustitución física.

b.2.1.3<sup>a</sup> Obsérvese como a igualdad de cemento de mezcla 80/20 ó 70/30 y cemento matriz acompañante PY-4 ó PY-6 y edad final del ensayo de 365, 545 y/o 730 días, el comportamiento de las puzolanas ensayadas, es función de su contenido respectivo (más probable) de  $Al_2O_3^r$  según la POP, de manera que han quedado claramente clasificadas en función de su distinto grado de susceptibilidad ante el ataque de los iones sulfato, correspondiéndose la misma prácticamente con la obtenida mediante sus  $\Delta\emptyset$  respectivos a la edad del ensayo de 28 días, y mejor aún quizás a igualdad de cemento de mezcla 60/40, 70/30 u 80/20 por este orden, véase Tabla 23.

b.2.1.4\*. Por lo general, sea cual fuere el cemento portland matriz acompañante correspondiente, a igualdad de cemento de mezcla y edad del ensayo intermedia y/o final, las tortas correspondientes han mostrado, dentro de una misma familia los menores valores del  $\Delta\phi$  y PAV, y en general un mejor comportamiento que el resto de sus hermanas 70/30 y 80/20 por este orden de mejor a peor, sea cual fuese la puzolana empleada, siendo tal comportamiento relativamente bastante aproximado entre todas ellas 60/40, y más aún cuando el cemento portland matriz acompañante correspondiente ha sido un PY.

Finalmente y como compendio se puede decir que:

- a) La puzolana M en todos los cementos de mezcla PA ó PUZ con ella preparados y ensayados, disminuyó aún más si cabe, la resistencia al ataque de los iones sulfato del cemento portland matriz, ya fuere P (caso del P-1 y P-2) ó PY (caso del PY-4 y PY-6), correspondiente, pudiéndose destacar que la  $Vc\phi$  de la torta del cemento matriz P ó PY solo pero, en especial la de los PY, es muy distinta de la de los cementos de mezcla correspondientes.

En definitiva la puzolana M actuó, como se ha visto (en la POP) y verá (mediante el método ASTM C 452 e H-1) en sentido opuesto a la D, es decir, de un modo destructivo no pudiendo evitar con su presencia, en las proporciones ensayadas, eliminar o disminuir las expansiones de las tortas de los cementos portland P-1 y P-2, solos, por lo que se puede decir con fundamento que no mejora el comportamiento de los cementos P-1 y P-2 en este medio tan selenitoso, y en definitiva no aumenta su grado de RS respectivo.

- b) La puzolana C :

- en cemento de mezcla 80/20 : disminuyó la resistencia al ataque de los iones sulfato de los cementos portland puros P-1 y P-2.
- en cementos de mezcla 70/30 y 60/40: aumentó la resis-

tencia al ataque de los iones sulfato de los cementos portland solos P-1 y P-2, aunque en el caso de este último, tal aumento se ha confirmado con posterioridad a la edad de 90 días, pues hasta dicha fecha ocurrió lo contrario, por escaso margen.

c) La puzolana A :

- en cemento de mezcla 80/20: disminuyó la resistencia al ataque de los iones sulfato de los cementos portland solos P-1 y P-2.
- en cemento de mezcla 70/30: aumentó, en menor cuantía que la anterior C, la resistencia al ataque de los iones sulfato de los cementos portland solos P-1 y P-2.
- en cemento de mezcla 60/40: aumentó en mayor cuantía que la anterior C, la resistencia al ataque de los iones sulfato de los cementos portland solos P-1 y P-2.

d) La puzolana O :

- en cemento de mezcla 80/20: disminuyó también en menor cuantía que los anteriores A y C, la resistencia al ataque de los iones sulfato de los cementos portland solos P-1 y P-2.
- en cementos de mezcla 70/30 y 60/40: aumentó también ligeramente - respecto a la puzolana C -, y menor - respecto a la puzolana A -, la resistencia al ataque de los iones sulfato de los cementos portland solos P-1 y P-2.

e) La puzolana D : Todos los cementos de mezcla preparados

con ella, aumentaron la resistencia al ataque de los iones sulfato de los cementos portland solos P-1 y P-2. En definitiva la puzolana D operó, como se ha visto, en sentido opuesto a la M, o sea, disminuyendo las expansiones de las tortas de los cementos portland P-1 y P-2, por lo que se puede decir con fundamento que mejora el comportamiento de los cementos P-1 y P-2 en este medio tan selenitoso.

b.3. Caso de que el cemento portland matriz acompañante sea el P-31 y las puzolanas comerciales CV-10 y CV-19, comparando los tres cementos entre sí, es decir, el P-31, el P-31/CV-10 70/30 y el P-31/CV-19 70/30.

1°. Las clasificaciones obtenidas - en orden creciente de RS correspondiente al decreciente del  $\Delta\emptyset$  de la torta respectiva - mediante el  $\Delta\emptyset$  respectivos a igualdad de edad, de los dos cementos puzolánicos 70/30, P-31/CV-10 y P-31/CV-19 y su cemento P-31 matriz sólo han sido de menor a mayor por este orden:

a) hasta la edad de 90 días, inclusive,

$<\Delta\emptyset<$	P-31/CV-19 < P-31 < P-31/CV-10	h.90 d.
---------------------	--------------------------------	---------

b) a la edad de 180 días,

$<\Delta\emptyset<$	P-31/CV-19 < P-31/CV-10 < P-31	de 90 a 180 d.
---------------------	--------------------------------	----------------

c) desde la edad de 365 días hasta final del ensayo,

$<\Delta\emptyset<$	P-31/CV-10 < P-31 < P-31/CV-19	de 180 a 730 d.
---------------------	--------------------------------	-----------------

Como se puede observar a lo largo del ensayo se ha producido una inversión de posición entre las dos puzolanas ensayadas. A continuación prosígase esta discusión al inicio de su interpretación venidera correspondiente VIII.1.2.2.3. (E), 7°, sita en la parte final de dicho apartado.

5°.- Finalmente se ha de destacar que, en general, los valores del parámetro  $Vc\emptyset$  son bastante menores a últimas edades que a las primeras e intermedias, como cabía esperar, habiendo sido tal diferencia generalmente más acusada en los cementos de mezcla que en su correspondiente P-31 solo.

; y en aquellos conforme la puzolana se parece más en comportamiento a la referencial aluminica M que a la referencial silícica D, habiéndose producido en ocasiones, una  $Vc\emptyset$  negativa en aquella.

6°.- Las clasificaciones obtenidas a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ de las puzolanas D, O, A, C y M así ensayadas y comparadas, a las edades fundamentales del ensayo de 1, 7, 28, 90, 365 y 730 días, en función del  $\Delta\emptyset$  (%) de sus tortas respectivas, de menos a más por este orden, han sido las siguientes, véase Tabla 23.



7<sup>a</sup>.- De los 36 cementos de mezcla preparados con las puzolanas C, A, C, CV-10 y CV-19, respectivamente, y así ensayados:

- 10 (47,37%), han resultado ser de elevada RS, puesto que el  $\Delta\emptyset_{28d} \leq 1,25\%$ ,
- 3 (7,89%), han resultado ser de moderada RS puesto que  $1,25\% \leq \Delta\emptyset_{28d} \leq 4,00\%$ , y
- 17 (44,74%), han resultado ser de escasa o baja RS, puesto que el  $\Delta\emptyset_{28d} > 4,00\%$ ,  
toco ello según la Tabla 18.

8<sup>a</sup>.- Para finalizar esta discusión y dentro del estudio comparativo de los métodos de ensayo empleados en este trabajo, L-A, ASTM C 452 e H-1, se puede decir que el comportamiento de cada puzolana elegida en este método de ensayo de L-A, se ve directa o indirectamente confirmado en mayor o menor medida, mediante los dos últimos anteriores, es decir, mediante el ASTM C 452 e H-1, como se podrá comprobar en sus apartados correspondientes venideros.

#### Discusión VIII.1.2.2.3 (F)

(F) Parámetro: PAV, véase Tablas 19, 21, 24 y 26.

- a) Caso de que el cemento portland matriz acompañante haya sido el P-1 ó el P-2 (ambos de contenido elevado de  $C_3A$ ) y las puzolanas D, O, A, C ó M:

1<sup>a</sup>.- A igualdad de cemento portland matriz acompañante:

Excepto en el caso de la puzolana D, en el resto de puzolanas, O, A, C y M, ocurren fenómenos distintos en función de la cuantía de su presencia en el cemento de mezcla, así por ejemplo,

- caso de los cementos de mezcla 80/20:

En todos ellos el PAV de la torta correspondiente alcanza su máximo de penetración (40 mm) cuya permanencia y duración en el tiempo es por lo general hasta de varias edades intermedias y en ocasiones alguna final, y que tan solo llega a la mayor duración en el tiempo, del valor máximo alcanzable en dicho parámetro (40 mm) en el caso de la puzolana M y el cemento matriz acompañante P-1, pasando a mínima duración del mismo.

- caso de los cementos de mezcla 70/30:

En todos ellos el PAV de la torta correspondiente alcanza, por lo general, un máximo de penetración a una sola edad, con la excepción de la puzolana M que, o bien el máximo valor de dicho parámetro tiene mas de una edad de permanencia, caso de que el cemento matriz acompañante haya sido el P-1, o bien alcanza dos máximos en dicho parámetro, caso de que aquél haya sido el P-2.

También es destacable que mientras el máximo alcanzado en el caso de las puzolanas O y A disminuye hasta la edad de 365 días, en el caso de las puzolanas C y primer máximo de la M, disminuye hacia la edad de 28 ó 7 días respectivamente

- caso de los cementos de mezcla 60/40:

En este último caso ocurre por lo general como en el anterior pero con órdenes de magnitud menor aunque con la excepción acostumbrada de la puzolana M.

También es destacable en este caso la propiedad que poseen las tortas de endurecer bastante lentamente, destacándose sobre todo la torta correspondiente a la puzolana C que desde la edad de 1 día se mantuvo constantemente endurecida hasta el final del ensayo.

2.- A igualdad de puzolana:

Excepto en el caso de las tortas preparadas con la puzolana A, en el resto ocurren fenómenos distintos en función de la cantidad de puzolana añadida al cemento de mezcla correspondiente, así por ejemplo,

- caso de los cementos de mezcla 80/20:

En todos ellos el PAV de la torta correspondiente adquiere su máximo valor posible común, cuya permanencia y duración en el tiempo es función directa del contenido absoluto de  $C_3A$  de la fracción cemento matriz acompañante correspondiente P, de aquí que en los casos en que el mismo fué el cemento P-1, dicha duración fué mayor que en los casos en que el mismo fué el cemento P-2.

- caso de los cementos de mezcla 70/30:

En todos ellos el PAV de la torta correspondiente adquiere, por lo general, con suaves alternancias, un valor máximo -que tan sólo llega al máximo posible alcanzable en dicho parámetro en el caso de la puzolana M-, cuya permanencia y duración en el tiempo es, con la excepción citada, de una sola edad, y cuya cuantía es función directa del contenido absoluto de  $C_3A$  de la fracción cemento matriz acompañante correspondiente P. De aquí que por lo general, haya sido mayor el valor del PAV alcanzado en los casos en los que el cemento matriz acompañante correspondiente ha sido el P-1, que en los casos en los que el cemento matriz acompañante correspondiente ha sido el P-2 (excepto en los de la puzolana C).

- caso de los cementos de mezcla 60/40:

Por lo general en éstos ocurre el mismo fenómeno anterior citado aunque en mucha menor cuantía, excepto el de la puzolana M que permanece en parecido orden de magnitud que aquéllos.

Finalmente se ha de destacar que en todos los casos expuestos, las tortas preparadas, tras alcanzar su(s) máximo(s) valores de PAV correspondiente(s) o bien nacer con el mismo, tuvieron por lo general temprano o tarde la propiedad de endurecerse aunque de una forma notablemente lenta y segura en el tiempo, llegando incluso en uno de los casos, torta P-2/C 60/40, a nacer y permanecer durante todo el ensayo endurecida.

- b) Caso de que el cemento portland matriz acompañante haya sido el PY-4 y el PY-6, respectivamente y las puzolanas D, O, A, C ó M:

Al ser los dos cementos de contenido nulo en  $C_3A$ , huelga hacer el estudio comparativo "a igualdad de puzolana", quedando tan sólo por hacer dicho estudio comparativo pero sólo "a igualdad de cemento", por lo que, al respecto se puede decir que excepto en el caso de la puzolana M, cuyos valores de PAV correspondientes a cada torta de cada cemento de mezcla con ella preparado, alcanzan valores de igual o parecido rango que en el caso de las tortas de los cementos de mezcla de cemento matriz acompañante correspondiente P, ya analizadas y estudiadas, en el resto de las puzolanas ensayadas D, O, A y C, se originan dos hechos totalmente distintos:

- o bien la torta permanece endurecida de principio a fin del ensayo, caso de las tortas de los cementos de mezcla de origen puzolana D ó O, y las tortas 60/40 de origen A ó C,
- o bien la torta permanece endurecida durante la mayor parte del ensayo para finalmente fracturarse, con tendencia final endurecedora, a las edades finales del ensayo, es decir, 365, 545 y 730 días, sobre todo a estas dos últimas como es el caso del resto de las tortas anteriores.

De todo lo anterior lo realmente destacable es que las tortas de los cementos de mezcla 60/40 preparados con las puzolanas A, C ó M actúen y fragüen muy lentamente desde edad(es) inicial(es) a final del ensayo, y por tanto evolucionen de un modo muy distinto a sus hermanas 80/20 y 70/30 correspondientes, las cuales tras alcanzar su máximo PAV respectivo -coincidente quizás con la máxima formación de ettringita destructiva de origen  $Al_2O_3^r$  de cada puzolana citada-, empiezan a endurecerse en las últimas edades del ensayo, causa por la cual su PAV respectivo disminuye aunque a esta edad merced quizás a una reacción distinta a la originaria expansiva de origen ettringita de la  $Al_2O_3^r$  de cada puzolana, como bien podría ser la de carbonatación de portlandita colmatadora de los poros resultantes de la reacción expansiva previa anterior y/o la de formación de ettringita expansiva del  $C_4AF$  que como se sabe se forma muy lentamente.

a) Tipo de probador: torta L-A  
b) Parámetro(s) medido(s) en la muestra:  $\Delta \phi$  (°),  $VT\phi$  (140/41a)

**TABLA 22**

2. Fotografia(s) correspondente(s) a esse  
Tema: 4813

[illegible]

- c) Caso de que el cemento matriz acompañante haya sido el P-31, y las puzolanas la CV-10 y la CV-19:

La clasificación obtenida de los cementos P-31, P-31/CV-10 y P-31/CV-19 mediante el PAV correspondiente de menos a mas, por este orden, alcanzado respectivamente a las edades que se citan ha sido la siguiente, véase Tabla 70.

No obstante se ha de constatar que la torta preparada con la puzolana CV-19, pese a aparecer troceada al final del ensayo, sus trozos eran duros y consistentes.

#### Interpretación VIII.1.2.2.3. (E)

De las Discusiones 1ª y 2ª : Al estar comprendidas, según la conclusión VII.4.2, 3ª (POP), estas puzolanas, O, A y C, entre las ya estudiadas (L-A), D y M, en la interpretación correspondiente a los resultados obtenidos se tendría en cuenta los correspondientes a las puzolanas D y M.

De la Discusión 3ª : Probablemente ello se deba a idéntica razón apuntada en la interpretación VIII.1.2.2.2. (E) (F), 2ª de la puzolana M, sólo que en estos casos de las puzolanas O, A, C, CV-10 y CV-19, y según la conclusión VII.4.2, 3ª (PCP), en la competitividad allí citada participará menor cantidad de  $Al_2O_3^r$  que en el caso de la M, véase interpretación VIII.2.2.2.7 (E) (F) (G) (H) (I) de la discusión 1ª (E) (venidera).

De la Discusión 4ª :

- a) A igualdad de puzolana:

- a.1.- Caso de que el cemento portland matriz acompañante haya sido el P-1 ó el P-2:

Probablemente ello se deba a que si el  $\Delta\emptyset$  y  $Vc\emptyset$ , de cada torta es originado por la formación de su ettringita total respectiva, (suma de la ett-1f más la ett-rf), y ésta a su vez función del  $C_3A$  de su fracción P correspondiente y de la  $Al_2O_3^r$  de su fracción puzolana respectiva; es evidente que cuando la ett-rf de esta última fuere escasa, como bien pudiera serlo la de las puzolanas D, O, A y C, sería el primer sumando ett-1f, con sus consecuencias, el exclusivo. De aquí que en tal caso el  $\Delta\emptyset$  y  $Vc\emptyset$  de tales tortas, haya de aumentar con el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz P que las conforma, y viceversa, como así ha ocurrido en este trabajo. En tal caso, tales puzolanas citadas se podría decir que han actuado, además de como tales puzolanas, como un INERTE  $R_3$ , al igual ó mayor aún generalmen-

te a como ocurriese con la D ya estudiada.

Por otra parte, al deber tener el resto de las puzolanas ensayadas bastante más  $Al_2O_3^{r-}$  que la D según la conclusión VII.4.2., 3ª (POP) podrán participar de lo ocurrido a la M en igual caso e interpretación VIII.1.2.2.2. (E) (F) correspondiente en cuanto más  $Al_2O_3^{r-}$  la posean, de aquí que hayan de participar más del comportamiento e interpretación de esta última M que las de aquella D, como así ha ocurrido en este trabajo.

b) A igualdad de cemento portland matriz acompañante P ó PY:

b.1.- Caso de que el cemento portland matriz acompañante haya sido el P-1 ó el P-2:

b.1.1. Caso de la puzolana D: Ya visto en su apartado anterior correspondiente VIII.1.2.2.1. (E).

b.1.2. Caso de las puzolanas O y D : La razón explicativa del relativo comportamiento similar y con valores de distinta magnitud, principalmente a edades intermedias y posteriores, que no a iniciales, de la puzolana O y de la D, probablemente resida en el hecho de que la puzolana O:

- . al no ser tan porosa como la D no podrá tener un poder de imbibición de agua de hidratación, con lo cual no se podrá hidratar con la adición de la misma, de menos (el cemento de mezcla 80/20) a más (el cemento de mezcla 60/40), la fracción P ó PY acompañante, no dando por ello a edades iniciales una cadencia de  $\Delta t$  similar a la obtenida en el caso de la puzolana D,

- . al no tener tanta  $Al_2O_3^{r-}$  como el resto de puzolanas, A, C y M, su proximidad de resultados y comportamiento a los de la puzolana D, podría ser la mayor de todas ellas, lo cual se ve confirmado en parte porque al haberse originado, a igualdad de edad y cemento de mezcla, mayores  $\Delta t$  en el caso de la puzolana O, que en el caso de la puzolana D, tan sólo la mayor cantidad de  $Al_2O_3^{r-}$  de aquella sobre ésta (coincidente en igual sentido y quizás distinta cuantía con sus respectivas cantidades totales absolutas, 13,84% de  $Al_2O_3^{r-}$  de O > 1,91% de  $Al_2O_3^{r-}$  de D, y/o relativas 1,0 MF de O > 0,8 MF de D), podría ser la explicación posible, al tener que dejar libre por tanto, mayores cantidades del 15,50% de  $SO_3$  agresivo total inicial, en el caso de la puzolana D que en el caso de la puzolana O,

para poder ser fijados por el  $C_3A$  del cemento matriz P que las acompañe, siempre y cuando éste aporte el suficiente y necesario  $C_3A$  para tal fin y sus consecuencias, de aquí que en el caso del cemento matriz acompañante P-2 se cumpla que,

> Δ Ø >	P-2/O 80/20 > P-2/D 80/20	p.f.e.
	P-2/O 70/30 > P-2/D 70/30	
	P-2/O 60/40 > P-2/D 60/40	

confirmándose aún mas si cae conforme transcurre el ensayo, lo cual viene a demostrar que el contenido de  $Al_2O_3^{F-}$  (% de la puzolana O ha de ser necesariamente mayor que el de la puzolana D; y para el caso del cemento P-1 se cumple lo contrario, o sea que

< Δ Ø <	P-1/O 80/20 < P-1/D 80/20	a l d.
	P-1/O 70/30 < P-1/D 70/30	
	P-1/O 60/40 < P-1/D 60/40	

ocurriendo ello porque la puzolana D deja más yeso agresivo libre que la O (véase Tablas 40, 47 y 68), y el cemento portland P-1 aporta  $C_3A$  suficiente para tal fin, no pudiéndose conservar en el tiempo esta relación como cabía esperar.

No obstante se ha de admitir a la vista de la Fot. 3, que las deducciones del comportamiento de cada una de las puzolanas ensayadas y comparadas, D, O, A, C y M con el cemento de mezcla PY-4 ó PY-6 (0,00%  $C_3A$ ) pueden resultar para algunos a simple vista engañosas al menos en lo que respecta a la O, la cual en tales casos ha mostrado aparentemente un similar comportamiento a la sílice D, cuando los valores del Δ Ø correspondiente confirman lo contrario, véase Tablas 20 y 22, pero ello en todo caso es excusable dada la falta de sensibilidad de la cámara fotográfica correspondiente para poder captar las diferencias de Δ Ø habidas, a igualdad de lo demás, entre ambas en

tales casos. No obstante ello se vé subsanado totalmente por el muy diferente comportamiento de ambas puzolanas D y O cuando las mismas se mezclaron con un cemento portland de contenido elevado de  $C_3A$ , en este caso el P-2 (11,09%  $C_3A$ ), Fot. 4, en cuyo caso la presencia de la puzolana O no logra evitar ó impedir el ataque de los iones sulfato al  $C_3A$  de la fracción P-2 que le acompaña en cada caso - aún admitiendo que en ambos casos, con PY-4 ó PY-6 y P-2, respectivamente, el ataque de tales iones  $SO_4^{=}$  a la misma haya existido con prontitud (ett-rt) según la POP-, mientras que la D sí, véase Fot.1.

Por todo ello se ha de convenir que la puzolana O no se puede considerar en absoluto como eminentemente silícea ó similar, ni tampoco aluminica obviamente, por lo que se habrá de convenir que se deberá considerar mas como sílico-aluminosa ó sílico-alumínica, residuando quizás su protección a ciertos casos a que su contenido de  $Al_2O_3^{F-}$  puede ser muy reactivo y forme quizás muy rápidamente su ett-rt correspondiente, o sea, ria, y al efecto diluyente de la misma sobre el cemento portland con el que se coaligue.

b.1.3. Caso de las puzolanas O y A :

Probablemente ello, pese a lo aparentemente paradójico (29 mediciones comparativas realizadas dan la mayoría de  $\Delta\theta$  de la puzolana O sobre la A, y 19 al contrario), se puede deber al hecho supuesto de que la puzolana O tuviere una cantidad de  $Al_2O_3^{F-}$  inferior a la de la A (coincidente en igual sentido y quizás distinta cuantía con sus respectivas cantidades de totales absolutas, 13,84%  $Al_2O_3$  de O < 19,36%  $Al_2O_3$  de A, y/o relativas 1,00 MF de O < 1,61 MF de A), en cuyo caso la fijación por aquella de  $SO_3$  agresivo sería la menor (posiblemente dentro de márgenes no muy grandes), con lo cual el cemento portland matriz acompañante, ya fuere el P-1 ó el P-2, podría disponer de mayor cantidad del mismo, para, de este modo, poder en su caso, parecerse,



más y mejor, en comportamiento, según este método de ensayo, al cemento

P-4 (10,71%  $C_3A \approx 0,8 \times 14,11\%$   $C_3A$  de P-1 = 11,29%),  
P-32 (9,30%  $C_3A \approx 0,7 \times 14,11\%$   $C_3A$  de P-1 y  $\approx 0,8 \times 11,09\%$   $C_3A$  de P-2 = 8,87%  $C_3A$ )  
P-31 (7,62%  $C_3A \approx 0,6 \times 14,11\%$   $C_3A$  de P-1 y  $\approx 0,7 \times 11,09\%$   $C_3A$  de P-2 = 7,76%  $C_3A$ ), y/o  
P-5 (6,83%  $C_3A \approx 0,6 \times 11,09\%$   $C_3A$  de P-2 = 6,65%  $C_3A$ ),  
cuyos comportamientos respectivos en este método de ensayo L-A, se encuentra en la Tabla 17.

Y entrando con algo más de detalle se puede observar además que del desglose de los números de mediciones totales efectuadas, se obtiene (véase Tabla 25)

Tabla 25

Cemento portland matriz acompañante común :	Nº total de mediciones a favor de la puzolana		Desglose del Nº total de mediciones a favor de cada puzolana					
			Cementos de mezcla preparados con :					
	0	A	la puzolana "O"			la puzolana "A"		
			80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40
P-1			4	5	4	4	2	4
	29	19						
P-2			4	3	8	4	5	0

Se puede avalar el supuesto citado anteriormente por el hecho de que, en el caso de los cementos de mezcla 60/40 respectivos de la puzolana O y A, y cemento portland matriz acompañante P-2 (aportando un 6,65% de  $C_3A$  que está próximo al 5% que separa a los cementos P de los PY según norma), ninguna medición de las ocho efectuadas en la torta correspondiente a esta última puzolana A, han dado mayoría de  $\Delta\emptyset$  sobre las correspondientes de la torta perteneciente a la puzolana O, mientras que en el caso de que el cemento portland matriz acompañante ha sido el cemento P-1 (aportando un 8,47% de  $C_3A > 5\%$  de  $C_3A$ ), ha habido cuatro, como cabía esperar.

Ello es señal inequívoca de la probable certeza de la hipótesis explicativa inicial, pues la puzolana A al tener más  $Al_2O_3^{r-}$  que la O, según el supuesto inicial citado, fijará más  $SO_3$  agresivo del 15,50% total inicial, que la O, con lo que el cemento portland matriz común que las acompañe podrá disponer de menos  $SO_3$  agresivo del total inicial. No obstante si tal cemento aportare suficiente  $C_3A$ , caso del P-1, que no el P-2, por las razones que se verán más adelante, mayores  $\Delta\emptyset$  originará, más bien tarde que temprano,

como así ha ocurrido en este trabajo, pues temprano (edades iniciales e intermedias) a menos  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana, caso de la O, mas  $SO_3$  fijará el  $C_3A$  del cemento matriz acompañante P-1, quedando menos  $C_3A$  disponible para edades posteriores, debiendo de ocurrir lo contrario para el caso de la puzolana A, por lo ocurrido en este trabajo.

Por otra parte no cabe olvidar que en la obtención de los resultados ha colaborado también el carácter de inerte  $RS$  mas o menos aparente de las puzolanas, el cual menoscaba, el carácter como tal puzolana, y si este último se midiera, entre otras cosas, por el contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  de las mismas, se podría decir, según la hipótesis inicial, que la puzolana O ha actuado mas como  $INERTE_{RS}$ , que la A, por tener menos  $Al_2O_3^{r-}$ , por ello ha dejado mas  $SO_3$  libre para que pudiera reaccionar con el  $C_3A$  de su fracción cemento portland matriz acompañante común P-1 ó P-2.

Finalmente y respecto a lo expuesto en el final del segundo párrafo de la presente discusión referente a que tan sólo cuatro (en las últimas edades del ensayo), de las ocho mediciones efectuadas, han sido mayores en el caso de la torta 20/20 de la puzolana O y cemento portland matriz acompañante P-1, una en las tortas 70/30 y tres en las 60/40, las únicas explicaciones posibles podrían ser,

- o bien, que al tener muy posiblemente la puzolana O mas  $Al_2O_3^{r-}$  que la A, permite menor disponibilidad de  $SO_3$  para ser fijado por el  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante P-1, con sus consecuencias expansoras subsiguientes, es decir, mayores  $\Delta\theta$  ulteriores, como así ha ocurrido en este trabajo, ó

- o bien, que pese a tener muy posiblemente la puzolana O menos  $Al_2O_3^{r-}$  que la A, la misma ha de ser de mas "calidad" ó mas "lábil" o en mejor disposición para fijar  $SO_3$  muy rapidamente\* con sus consecuencias expansoras correspondientes (¿si una es "reactiva" la otra es "activa"? ¿si una es reactiva-activa la otra es "cristalina débil" ó cristalina de baja energía de formación ó la suficiente para ser lenta pero progresivamente disuelta por la reserva portlandítica del medio?), lo cual quítale posibilidades al  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante P-1 de formar, a la par, ettringita de tal origen con sus consecuencias expansoras ulteriores, pudiéndola formar, por el contrario, por sus características propias, y las de sus acompañantes, mas tardíamente, como así ha ocurrido con los  $\Delta\theta$  originados notablemente mayores a edades intermedias

y/o finales en este trabajo, o bien ambas a la vez, en mayor o menor medida.

No obstante y en cualquier caso, lo único cierto es que tales contenidos respectivos de  $Al_2O_3$  de las puzolanas O y A deben ser muy próximos entre sí.

b.1.4. Caso de las puzolanas A, C y M :

- A la edad de 1 día: Probablemente ello se deba a la conclusión VII.4.2., 10ª (POP), o sea, a la mayor Vf de la ett-rf que de la ett-lf, de aquí que a más puzolana añadida más  $Al_2O_3$  aportado, más ettringita de rápida formación originada y más  $\Delta\phi$  creado en la torta correspondiente.
- Desde la edad de 7 hasta la de 180 días : Probablemente ello se deba a idéntica razón apuntada en el apartado anterior, es decir, al ser en este caso la puzolana A la que en general menor  $\Delta\phi$  origina respecto a la C, y la M por este orden, probablemente sea la que menos  $Al_2O_3$  debe de poseer, con lo que menor cantidad de ett-rf originará de todas ellas; por lo tanto ha de ser con ella con la que la fracción  $C_3A$  aportada por el cemento portland matriz P-1 ó P-2 acompañante correspondiente, empiece antes a mostrar su "influencia" con sus consecuencias, sobre la torta respectiva, y más pronto aún conforme más  $C_3A$  aporte la misma, de aquí que esta puzolana y el cemento portland matriz acompañante P-1 se haya cambiado a los 7 días de edad, tan sólo, el sentido del crecimiento diametral de las tortas correspondientes, mientras que con sus homónimas del cemento P-2 lo ha cambiado más tarde a la edad de 28 días.
- Desde la edad de 180 días hasta el final del ensayo: Probablemente ello se deba a la razón anterior corregida y aumentada pero aplicable principalmente a la puzolana A y C, que no a la M, ya que para esta última habrá que tenerse en cuenta lo dicho a propósito de la misma en la interpretación VIII.1.2.2.2. (E) y (F), 7ª, de las tortas de los cementos de mezcla preparados con tal puzolana y más concretamente, las P-1/M, P-2/M, y las P-31/M, la cual y en definitiva viene a decir que debe de ser tan elevado el contenido de  $Al_2O_3$  de la puzolana M respecto al de las demás puzolanas ensayadas, que sobre todo en sus cementos de mezcla 70/30

y 80/20 prevalece su "influencia" constantemente a lo largo de todo el ensayo; por lo que al ser menor el contenido de  $C_3A$  del (11,09%) cemento portland matriz acompañante P-2, de origen, le dejará libre a aquella, la M, mayor cantidad de  $SO_3$  agresivo del total inicial, que el P-1; de aquí que se originen mayores  $\Delta\phi$  con aquél, P-2, que con éste, P-1, como así ha ocurrido en este trabajo. No obstante tampoco se puede desdeñar la razón apuntada en la interpretación VIII.2.2.2.7.,2ª venidera (puesta allí por su mayor razón de ser) referente a que la mayor acción sinérgica se consigue en las tortas donde el cociente  $\frac{Al_2O_3^{r-}}{C_3A (\%)}$  es el máximo posible

pero sin llegar a ser infinito.

Por lo tanto y en el caso de las puzolanas A y C, el mejor comportamiento de las mismas, en general, a medida que aumenta su presencia, probablemente sea debido a la menor reserva portlandítica y de  $C_3A$  y  $C_4AF$  con sus consecuencias expansoras correspondientes, pues las mismas aumentan con la disminución de puzolana; con lo que pese a la menor aportación de  $Al_2O_3^{r-}$  de las puzolanas A y C y también M, en el caso de la torta correspondiente a su cemento de mezcla 80/20, respectivo, ésta es la mas fraguada, sobre todo, con el cemento portland PY-6 de acompañante; de aquí que a poca  $Al_2O_3^{r-}$  "aprisionada" en el interior de la torta, fraguada, actuará de suficiente cuña expansora al pasar ulteriormente a  $ett-rf \ 2^{ria}$ , que de este modo expandirá más violentamente con posterioridad.

No obstante y como se ve esta hipótesis explicativa únicamente resulta válida quizás por tal motivo para dichas tortas 80/20, pero no para las 70/30 y 60/40 hermanas, pues como se puede observar en las mismas y para el caso de la puzolana C ocurre todo lo contrario, es decir, mejor comportamiento, dentro de lo normal, de las tortas 70/30 y 60/40 con P-1 ó P-2, de aquella C que de la puzolana A; por lo que ello ha de achacarse forzosamente a la misma razón VI.1.2.1.2.,1ª (c), Agrupación G, es decir, a la mayor

presencia de alcalinos, expresados como  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , y menor reserva portlandítica de estas tortas 70/30 y 60/40 de la puzolana C sobre las de la A, con disminución apreciable, según la Fig. 4, del nivel de portlandita liberada en la hidratación selenitosa necesaria y suficiente para poder formar ettringita de cualquier origen, pese a que estén presentes sus reactivos  $\text{Al}_2\text{O}_3^-$  y/o  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  necesarios y suficientes para ello. Y como confirmación está el hecho de que cuando el cemento portland matriz acompañante es de notable o elevado contenido de  $\text{C}_3\text{S}$ , caso del PY-4 ó PY-6, lo ocurrido a todas las tortas 80/20 de la C, le ocurre también a todas las 70/30 hermanas, incluso a los PY-4 ó PY-6/C 70/30, por idéntico motivo, mayor reserva portlandítica, la cual y en las PY-4 ó PY-6/C 60/40 deberá seguir siendo "controlada" por los alcalinos expresados como  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  de la puzolana C, salvaguardando de este modo de su autodestrucción selenitosa a tales tortas 60/40 de la misma.

Por lo tanto según todo lo anterior la puzolana C se tendrá que encontrar entre la A y la M como lo atestiguan los resultados con ella obtenidos.

Todo ello viene avalado además por el hecho ya conocido de que en el caso de las puzolanas referidas D y O cuyo  $\text{Al}_2\text{O}_3^-$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  respectivos (sólo conocido cuantitativamente el segundo y por sus efectos el primero), son menores a los de las puzolanas A, C ó M, por este orden de menos a más, el aludido cambio de sentido en el crecimiento diametral se les produce de origen, como en realidad debe ser según la razón apuntada.

Caso de las puzolanas C y M :

Probablemente sea debido a que pese a tener la puzolana C el máximo contenido absoluto de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , de entre todas las naturales, de la misma, sólo una pequeña parte, bastante menor, al parecer, que la que debe tener la puzolana  $\text{M}^{2*}$ , debe de estar en forma reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^-$ ; de aquí que frente a notables cantidades competidoras de  $\text{C}_3\text{A}$ , aportadas

por cementos P acompañantes, no pueda aquella ejercer ni mantener su "influencia" y por tanto competir al modo que lo hace la  $Al_2O_3^r$  de la puzolana M.

Además los resultados obtenidos con esta puzolana C y el cemento portland matriz acompañante P-1, avalan las hipótesis anteriores citadas al respecto desde los últimos párrafos del punto anterior hasta aquí; pues mientras que la torta 80/20 parece "semejarse" ó "aproximarse" más a la homónima 60/40 de la puzolana A, la 60/40 lo hace a la homónima 80/20 de la puzolana M, con lo cual la 70/30 habría de quedar, como ha quedado en este trabajo, entre ambas hermanas, 80/20 y 60/40.

Por el contrario en el caso de que el cemento portland matriz acompañante sea el P-2, se ha de verificar lo apuntado al principio del apartado último por idéntico motivo.

Y todo ello además sin olvidar el notable mayor contenido de  $Na^+$  y  $K^+$  de la C sobre la M, con su "protección" correspondiente ya referida antes.

- b.2. Caso de que el cemento portland matriz acompañante haya sido el PY-4 ó PY-6:

Probablemente ello sea debido a lo ya apuntado para el caso de las puzolanas O, A, C y M con los cementos matrices acompañantes P-1 ó P-2 a la edad de 1 día, o sea, debido a la ett-rf de la puzolana principalmente; de aquí que a más puzolana, con más  $Al_2O_3^r$  añadida, más  $Al_2O_3^r$  aportada a la torta correspondiente, más ett-rf originada y más  $\Delta\theta$  producido.

Todo ello queda aún más confirmado en este caso, ya que al no aportar  $C_3A$  la fracción cemento portland matriz PY-4 ó PY-6, por carecer éste de aquél, la  $Al_2O_3^r$  y sus efectos más o menos nocivos en un medio portlandítico y selenitoso, se manifiestan más y mejor y por más tiempos desde la edad de 1 sólo día (caso de los cementos matrices acompañantes correspondientes PY-4 ó PY-6), llegando incluso en estos casos hasta las edades finales de ensayo como se ve claramente en la Fot. 3 y Tabla 23.

Y en cuanto a la relativa aproximación en mejor comportamiento de las tortas 60/40 sobre las 70/30 y 80/20 por

este orden, hermanas o no respectivas, sea cual fuere la puzolana empleada D, O, A, C ó M y así ensayada, probablemente se deba más a que en tales tortas 60/40 no se alcanza la cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  en la fase líquida, necesaria y suficiente, según el ensayo de Fratini, para superar el valor de  $\text{pH} > 10,8$  exigible para la formación de ettringita expansiva y nociva de cualquier origen y etiología, que no a que en todas ellas no haya alcanzado mejor la estequiometría que "gobierna" el "sistema", lo cual lógicamente es imposible:

- a) porque la cantidad de reaccionante  $\text{C}_3\text{A}$  de la fracción cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY, es distinta en cada caso (la de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la fracción puzolana M es constante en todas las tortas, 60/40), lo cual debería originar cantidades distintas de ett-T y acción sinérgica correspondiente y por tanto muy distintos  $\Delta\theta$  de una torta a otra, y eso no ha ocurrido, sino todo lo contrario, en este trabajo,
- b) porque la estequiometría así nos lo confirma, ya que en la torta P-1/M 60/40 se debería haber originado, en teoría, hasta un 43,24% de ett-T, mientras que en su homónima PY-6/M 60/40, sólo un 7,83%, siendo la diferencia entre ambas ett-Totales del 36,01%, la cual no se corresponde, an absoluto, con la diferencia de  $\Delta\theta_{730}$  días habida entre ambas tortas, en este caso, del 0,75%, siendo un poco mayor pero aún insuficiente en el caso de la torta PY-4/M 60/40, del 13,24%, pero en cualquier caso ambas muy distintas y distantes de la diferencia teórica de  $\Delta\theta_{730}$  días que debería haber existido, próxima al valor de la diferencia de ambas ett-Totales anteriores, es decir, próxima al 36,01%, y eso no ha ocurrido, sino todo lo contrario en este trabajo, y
- c) porque para mayor abundamiento, en el caso de las tortas 60/40, de cemento portland matriz acompañante correspondiente PY-4 ó PY-6 respectivamente, y puzolana M, deberían haber tenido prácticamente igual o parecido  $\Delta\theta$  a la edad de 730 días, dado que la ett-T en ambos casos prácticamente deberá ser igual por ser la ett-rf constante y la ett-lf prácticamente nula-al ser prácticamente

nulos los contenidos de  $C_3A$  de tales cementos matrices PY-4 y PY-6-; y eso no ha ocurrido sino todo lo contrario, pues el  $\Delta\emptyset_{730}$  días de la torta PY-4/M 60/40 ha sido del — 12,47%, y el  $\Delta\emptyset_{730}$  días de la torta PY-6/M 70/30 ha sido de 25,56%, es decir bastante dispares, siendo mayor la del PY-6/M 60/40, muy probablemente por tener su cemento matriz acompañante correspondiente PY-6 un 79,43% de  $C_3S$ , esto es un 21,24% de  $C_3S$  más que el PY-4, lo cual le posibilita el poder disponer áquel, de origen en su fase líquida, mayor disponibilidad y reserva portlandítica y por consiguiente del  $pH > 10,8$  necesario y suficiente para facilitar una mayor formación de  $ett-rf$  y consiguientemente un mayor  $\Delta\emptyset$  de su torta en este caso la PY-6/M 60/40 sobre la PY-4/M 60/40 como así ha ocurrido en este trabajo. Todo ello sin olvidar la  $ett.$  de muy lenta formación o de origen  $C_4AF$  y sus s.s. y que también pudiera participar muy tardíamente.

De todo ello cabe deducir finalmente que una mayor adición de puzolana, por encima del 40% en peso, podría asegurar la no formación de toda o casi toda o al menos una gran parte de la ettringita previsible de cualquier origen y etiología, y consiguientemente la ausencia total de nocividad derivada de la misma. Pero ¿ Con tales porcentajes tan elevados de puzolana, sea la que fuere, se llegarían a cumplir con las especificaciones normalizadas existentes al efecto, y en especial las RMC y/o RMF características de 1, 3, 7 y 28 días ? Presumiblemente NO, como lo atestiguan los resultados correspondientes obtenidos, y que se verán más adelante, en probetas de mortero ASTM C 452 de  $1x1x6$  cm de estos cementos de mezcla PA y/o PUZ aquí ensayados, donde sobre todo, y por lo general, a las edades intermedias y finales del ensayo las probetas citadas de los cementos 'de mezcla 60/40, en casi todos los casos, han sido las que menores valores de RMC y RMF han mostrado, y previsiblemente los mostrarían aún menores, si tal adición de puzolana cualquiera hubiere sido superior al 40% en peso.



De la Discusión 6ª : La razón o razones de las distintas clasificaciones obtenidas han quedado de manifiesto en gran medida a lo largo del resto de las interpretaciones anteriores. De aquí que si en la competitividad existente entre el  $C_3A$  y el  $Al_2O_3^{F-}$  por la fijación de  $SO_3$  del 15,50% inicial, de cada torta y edad de la misma, se minimizara hasta prácticamente anularse, la primera,  $C_3A \approx 0,00\%$  -caso de los cementos matrices acompañantes respectivos PY-4 y PY-6-, se monopolizaría la fijación de dicho  $SO_3$  en favor de su  $Al_2O_3^{F-}$  respectiva, la cual a través de su ett-rf correspondiente se podrá manifestar,  $\Delta\theta$  (%), sin "competencia" alguna libre y proporcionalmente a su contenido de  $Al_2O_3^{F-}$  respectivo originaria. De aquí que pueda decirse que el  $\Delta\theta$  a edades iniciales de cada una de las tortas de los cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes a cada puzolana ensayada, y cada uno de aquellos, ha de ser proporcional al contenido absoluto y relativo de  $Al_2O_3^{F-}$  en cada una de ellas; por lo que podrían por tanto ser válidos los valores de dicho parámetro de las mismas, a una edad inicial dada, para compararlas sin más que hacerlo a igualdad de cemento de mezcla. Debiendo ser las consecuencias de las clasificaciones que se obtuviesen a tales edades iniciales, tanto más exactas y repetibles ~~( $0 < A < B < C < D < E$ )~~ cuanto más y mejor el cociente  $\frac{\% Al_2O_3^{F-}}{\% C_3A}$ , de cada cemento puzolánico supere o alcance un determinado valor, y viceversa, lo cual indicará - que a menor contenido de  $Al_2O_3^{F-}$  de la puzolana que se ensaye menor contenido de  $C_3A$  deberá tener el cemento portland matriz que la acompañe para que aquella se manifieste más exclusivamente y por lo tanto del mismo modo el mayor número de edades posibles, empezando por las iniciales del ensayo. Por ello tan sólo las puzolanas A, C y M (que según la conclusión VII.4.2.3ª, de la PCP son las que mayores contenidos de  $Al_2O_3^{F-}$  deben poseer, de estas cinco comparadas), deberán ser las que mayor repetibilidad clasificatoria respectiva mostrarían (31 casos de un total de 36) con los cementos portland matrices acompañantes PY-4 ó PY-6, incluso además en aquellos otros casos (ocho) en los que las puzolanas D y O (23 casos de un total de 36), por el motivo contrario, no la alcanzarán. Y todo ello porque como se dijo, el cociente antes citado fácilmente deberá ser superado por aquellas y todo lo contrario por éstas y tanto más difícilmente aún cuanto mayor sea la fracción de tales cementos PY-4 ó PY-6 que las acompañe, es decir mediante las tortas 80/20, como así ha ocurrido en este trabajo.

Y como confirmación de lo dicho, está el hecho de que todos los casos totales obtenidos, citados anteriormente, 17 de un total de 23, se obtienen durante los primeros 90 días de edad de las tortas, por tan sólo 6 a las edades finales de las mismas (ninguna de las cuales es en los 80/20). Y ello debe indicar que durante los primeros 90 días de edad la presencia del ión  $Al^{3+}$  de origen  $C_3A$

de la fracción PY-4 ó PY-6, debe ser aún lo suficientemente escasa como para no "competir" con su  $Al_2O_3^{F-}$  respectiva. No obstante según los trabajos y conclusiones de Malousek, Porter y Benton, dicha situación deberá ser mas difícilmente mantenible conforme transcurra el ensayo, pues a edades mas tardías y cuanto mas tardías mejor, la presencia del ión  $Al^{3+}$  competidor, de origen  $C_4AF$  y/o s.s. (preferentemente de estos últimos), puede ir en aumento, según tales investigadores, con lo que se impediría el mantenimiento de la repetibilidad alcanzado hasta la edad de 90 días.

- mas difícilmente para las puzolanas D y C, que para las puzolanas A, C y M, y
  - mas difícilmente mediante los cementos de mezcla 80/20, que mediante el resto,
- como así ha sucedido en este trabajo.

Y por último y como confirmación definitiva de lo anterior, están los pocos casos (5 de un total de 36) de repetibilidad clasificativa -  $\Delta \bar{C} < \bar{E} < \bar{C} < \bar{A} < \bar{C} < \bar{M}$  -, obtenidos cuando el cemento acompañante ha sido de elevado contenido de  $C_3A$ , caso del P-1 (14,11% de  $C_3A$ ) y el P-2 (11,08% de  $C_3A$ ) respectivamente. Pues en los mismos, la imposibilidad de "manifestarse" en exclusiva la Puzolana ha de ser muy escasa o prácticamente nula, de aquí la imposibilidad de clasificarla y mantener dicha clasificación por bastante tiempo, mediante aquéllos.

Finalmente cabe señalar aquí la parte correspondiente de la interpretación VIII.2.2.2.7 (E)(F)(G)(H)(I) de su discusión 2ª (venidera).

- c) Caso de que el cemento portland matriz acompañante haya sido el P-31 y las puzolanas acompañantes la CV-10 ó la CV-19:

Probablemente ello bien pudiera deberse a similar ó parecida razón de lo que normalmente ocurre, en situación semejante, con el diferente comportamiento ante el ataque sulfático de este ensayo de los cementos P y PY, ambos,

- 100 -

- de MF bien distintos, aunque de similar rango sus componentes  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$ , y
- de superactividad de dichos componentes, bien como  $C_3A$ ,  $C_4AF$  y  $C_2F$  o sus s.s. correspondientes según sea el cemento P ó PY en su caso, muy alta.

ya que en este caso de las puzolanas elegidas intencionalmente para fin del presente trabajo, ambas tienen

- su MF muy distinto, a la vez que los contenidos absolutos de  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$  de ambas, muy parecidos (ligeramente menor el  $Al_2O_3$  de la CV-10, lo cual viene a confirmar mas aún la posibilidad de que pueda ocurrir lo dicho al principio), y diferentes respectivamente, por la razón de intencionalidad citada, y
- al parecer distinto comportamiento ante los resultados respectivos obtenidos mediante las mismas en este método de ensayo, ver Tabla 70.

No obstante llama la atención el que la posible explicación aducida de citar, solo sea válida hasta la edad de 160 días de estas tortas, ya que a partir de dicha edad, el endurecimiento -potencialmente rápido y violento para estas tortas tan delgadas- y que se verifica en la correspondiente de la puzolana CV-10, sólo podría ser explicable por el hecho de que, de algún modo y anormalmente en tal caso se ha debido producir un endurecimiento relativamente rápido de la misma por acción indirecta de parte al menos, de la etf-rr y etf-lf que en el caso se dicen se aglutinan y que al completarse respectivamente -preferentemente la de origen  $C_3A$  por la razón que se aducirá mas adelante-, con posterioridad una vez fraguada la torta, la fragmentaría con la característica de relativa rapidez y violencia, es decir, con fragmentación en trozos duros, PAV = 2. de la misma, como así ha ocurrido en este trabajo.

No obstante se ha de tener en cuenta que dicho endurecimiento relativamente rápido ocurrido a la citada torta del cemento de mezcla P-31/CV-19 70/30, no se le produjo a la torta correspondiente del cemento P-31 matriz 6010 (véanse, si no, sus valores del PAV, Tabla 64), de donde cabe pensar en la posibilidad de que tal endurecimiento rápido le sea poco o nada imputable al  $C_3A$  de la fracción P-31 del cemento de mezcla P-31/CV-19 y sí, quizás, bastante mas a la  $Al_2O_3^{r-}$  de la fracción puzolana CV-19

acompañante, al originar con relativa prontitud ett-rf posiblemente cooparticipe y/o causa de la misma, lo cual está de acuerdo con las conclusiones 8ª, 9ª y 10ª de la POP y de las conclusiones 2ª y 5ª del apartado 1º, 5.1.1.2, de que la  $Al_2O_3^{rf}$  es pródiga de originar tal tipo de ett-rf CSA, que de algún modo "aprisionaría" por tal motivo en el interior de la torta la suficiente cantidad de  $C_3A$  y/o parte residual de  $Al_2O_3^{rf}$  para que mas tarde actuaran como se ha dicho con relativa rapidez y violencia al modo de "cuña expansora".

Por otra parte se puede decir además que en cierto modo lo ocurrido en este caso tiene cierto paragón o similitud con lo ocurrido para el caso de las puzolanas A, C y M con cemento P-1, P-2, PY-4 ó PY-6, de modo y manera que ambas tortas y en especial la preparada con la puzolana CV-10 se asemejan a las tortas de los cementos de mezcla 60/40 de aquéllas, mientras que la preparada con la puzolana CV-19 le ocurre lo mismo sólo que hasta los 180 días, para a partir de esa edad parecerse mas a las 80/20 y 70/30, según casos, correspondientes de aquéllos.

Por lo tanto y como resumen de lo expuesto se puede decir que:

1º.- Dado el muy distinto comportamiento que, a igualdad de cemento de mezcla PA y PUC, han mostrado las puzolanas referenciales silícica D y aluminica M, a través de los mismos, pues mientras que,

- la puzolana D aumentó en alguna medida, por lo general espectacularmente notable, la RS del cemento portland P ó PY con el que se coaligó,
- la puzolana M la disminuyó también espectacularmente pero en sentido opuesto,

de ambas puzolanas puede decirse con fundamento que poseen un carácter "anti-ataque sulfático" ó "pro-ataque sulfático", respectivamente, manifiestamente antagónicos, los cuales han resultado ser plenamente concordantes con,

- el contenido absoluto,  $Al_2O_3$ , y relativo, MF, de cada una de ellas,
- los resultados derivados del ensayo de Fratini, y
- la conclusión VII.4.2, 3ª (POP)

y hasta tal punto es antagónico, que ambas se pueden considerar como los dos casos mas extremos de todas las seleccionadas para la realización de este trabajo y posiblemente de casi todas las puzolanas, al menos en lo que se refiere a la D.

2º.- El resto de las puzolanas seleccionadas para este trabajo, O, A, C, CV-10 y CV-18, y comparadas con la silíceas D y aluminica M anteriores, se pueden considerar como comprendidas entre ambas, de aquí que su comportamiento haya resultado intermedio al de aquellas, pues, por lo general,

- a edades tempranas, han disminuido la RS del cemento portland matriz acompañante respectivo, P ó PY, mientras que,

- a edades tardías, lo han aumentado,

puediéndose denominar razonablemente a todas ellas, por tal motivo, con el nombre genérico de "SILICO-ALUMINOSAS" ó "ALUMINO-SILICICAS" como se verá en la Deducción X, 4ª (venidera).

No obstante y pese a lo cual, entre éstas, ha habido aún contrastes lo suficientemente apreciables como para poder diferenciarlas entre sí, para lo cual se referenciarán, bien en grupo ó individualizadamente, a una, al menos, de las referenciales anteriores D ó M, como se verá a continuación.

3º.- Respecto a la puzolana M sola, ya estudiada, lo único que aquí interesa destacar son las consecuencias derivadas, de

- su estudio bibliográfico, Taylor (161), Matousek (184),

- los Fundamentos Generales de este trabajo,

- la Conclusión VII.4.2.3ª (PCP), y

- la Interpretación VIII.1.2.2.2,

todas las cuales apuntan y confirman el que la misma haya de considerarse como una puzolana eminentemente "aluminica" por su muy probable mayor contenido de  $Al_2O_3^r$  que todas las demás seleccionadas para la realización de este trabajo, de aquí que su comportamiento haya sido única y exclusivamente como tal puzolana y nada en absoluto como  $INERTE_{RS}$ .

4º.- Respecto a las puzolanas A, C y M, se puede decir con fundamento que es el trío de puzolanas que ha mostrado un comportamiento mas homogéneo de todas en este método de ensayo de L-A. No obstante y dentro del contexto de relativa homogeneidad existente citada,

- la puzolana A es la mas discrepante de las tres, quizás

- por su probable menor contenido de  $Al_2O_3^r$  lo cual coincidiría con la conclusión 3ª de la PCP, y/o

- por su probable mayor comportamiento como  $inerte_{RS}$ ,

- la puzolana M es la que mas dicta e impone el carácter de homogeneidad al trío citado, quizás
  - . por su probable mayor contenido de  $Al_2O_3^r$ , lo cual coincidiría con la conclusión VII.4.2, 3\* (POP), y/o
  - . por su probable nulo comportamiento adicional como  $inerte_{RS}$  y sí únicamente como puzolana, y
- la puzolana C es intermedia a la A y la M, pero, a tenor de los resultados obtenidos, con mayor proximidad a ésta que a aquélla, dado que la puzolana A, a igualdad de edad y cemento de mezcla,
  - . ha aumentado ó disminuido mas que la C, y ésta disminuido menos que la M, la RS del cemento portland matriz acompañante respectivo, P-1 ó P-2, y
  - . ha aumentado menos que la C y ésta menos que la M, la RS del cemento portland matriz acompañante respectivo PY-4 ó PY-6,
 pero sin olvidar su parentesco, alumino-silícica, con la primera, A, dado su ligero comportamiento adicional como  $inerte_{RS}$ .

Por todo ello se deduce que según este método de ensayo de L-A, el contenido probable de  $Al_2O_3^r$  de las puzolanas A y C, respecto de la M, deberá ser de menor a mayor, por este orden,

$$Al_2O_3^r(\%) A < Al_2O_3^r(\%) C < Al_2O_3^r(\%) M$$

Y todo ello coincide básicamente con,

- el contenido absoluto,  $Al_2O_3^r$ , y relativo, MF, de cada una de ellas,
- los resultados derivados del ensayo de Fratini, y
- la Conclusión VII.4.2, 3\* (PCP).

5º.- Respecto a las puzolanas O y A, se puede decir que de entre todas las puzolanas silico-aluminosas de este subgrupo, O, A y C, así ensayadas y comparadas, la O y la A han sido las que han mostrado un comportamiento mas común en todos los casos, probablemente porque el mismo adicionalmente ha sido como un  $INERTE_{RS}$ . No obstante, la puzolana O se ha portado, por lo general, mejor que la A, pese a que aparentemente fuera lo contrario, dado que aquélla, a igualdad de edad y cemento de mezcla, ha aumentado por lo común, mas que ésta, la RS del cemento portland matriz acompañante respectivo, P ó PY.

Por lo tanto y según todo ello, el contenido de  $Al_2O_3^{F-}$  de la puzolana D debe ser cercano, pero menor, al de la A.

Ello coincide lógicamente con

- el contenido absoluto,  $Al_2O_3^{F-}$ , y relativo, MF, de cada una de ellas,
- los resultados derivados del ensayo de Fratini, y
- la Conclusión 3ª de la POP.

6ª.- Respecto a las puzolanas D y O, se puede decir que, la O ha mostrado, por lo general, un comportamiento peor que la D, dado que ésta ha aumentado mas que aquella la RS del cemento portland matriz acompañante respectivo P, que no PY. Y la muy relativa y lejana semejanza de comportamiento puede venirles porque la O ha mostrado un comportamiento adicional como - INERTE<sub>RS</sub> algo superior que la D, que no por su proximidad en el contenido de  $Al_2O_3^{F-}$ , ya que ambas lo deben poseer muy dispar pero en favor de la O.

Ello coincide lógicamente con,

- el contenido absoluto,  $Al_2O_3^{F-}$ , y relativo, MF, de cada una de ellas,
- los resultados derivados del ensayo de Fratini, cuando el cemento portland matriz acompañante respectivo fue el PY-4 ó el PY-6, y
- la Conclusión VII.4.2, 3ª de la POP.

7ª.- Respecto a las puzolanas CV-10 y CV-19 se puede decir que, en vista de que la primera, CV-10,

- disminuyó la RS inicial del cemento portland matriz P-31 solo,
  - y
  - aumentó la RS final del cemento portland matriz P-31 solo,
  - mientras que la segunda, CV-19, actuó de forma opuesta, es decir,
  - aumentó la RS inicial del cemento portland matriz P-31 solo,
  - y
  - disminuyó la RS final del cemento portland matriz P-31 solo,
- ha de adscribirsele a ambas un mal comportamiento, aunque no obstante la segunda, CV-19, y hasta la edad de 90 días, actuó mejor que la primera, CV-10, y viceversa, a edades ulteriores, lo cual conduce en este caso indefectiblemente al hecho de que la coincidencia con los resultados y/o conclusiones de ensayos posteriores realizádoles a ambas es diferente según la edad del ensayo que se considere, es decir,

- a edades iniciales (hasta 90 días), coincide con el contenido absoluto,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y relativo, %F, de ambas, y
  - a edades finales, con dichos contenidos respectivos pero cambiados de orden,
- mientras que la coincidencia es total con los derivados del ensayo de Fratini de ambas.

No obstante y para una mas y mejor comprensión de este caso concreto se aplicará aquí también íntegramente todo lo dicho en la Interpretación VIII.2.2.2.6 correspondiente a esta pareja de puzolanas estudiadas a través del método de ensayo ASTM C 452 y que se verá mas adelante.

8º.- Por lo tanto de todo ello se debe concluir que, según este método de ensayo L-A, el comportamiento de las puzolanas silico-alumino-sas industriales elegidas O, A, C, CV-10 y CV-19, es, en general, y como conjunto, bastante mas parecido al de la referencial aluminica M que al de la referencial silicia D, aunque entre ellas existen las naturales y suficientes diferencias físico-químicas constitutivas como para caracterizar e individualizar su respectivo comportamiento real.

#### Interpretación VIII.1.2.2.3 (F)

a) Caso de que el cemento portland matriz acompañante haya sido el P-1 ó el P-2:

1º.- A igualdad de cemento portland matriz acompañante correspondiente:

Como es lógico este parámetro, en estos tipos de cementos, P ó PY y PA ó PUZ correspondientes, es consecuencia directa de dos efectos opuestos ocurridos mas o menos al unísono, en el transcurso de la hidratación selenitosa de la torta correspondiente.

Tales efectos citados son,

- el endurecedor de la torta, que proviene normalmente y entre otros de los diversos silicatos de calcio hidratados  $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$  originados durante el transcurso de la hidratación selenitosa, ó de la carbonatación de una estructura muy porosa, y
- el no endurecedor ó "ablandador" con fragmentación, de la torta, que proviene normalmente de los diversos SACH originados durante el transcurso de la hidratación selenitosa, ó de la carbonatación de una estructura muy compacta.



Pues bien, lo que si es claro es que como resultado de la conclusión VII.4.2, 2ª de la POP, el hinchamiento de la torta, opuesto por lo común al lento fraguado de la misma, es debido, principalmente, a sus primeras edades, a la formación en su interior de  $\overline{\text{SACH}}$  expansivos de origen,

- $\text{C}_3\text{A}$  de la fracción cemento portland matriz P acompañante correspondiente, y/o
- $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la fracción puzolana respectiva,

Y como ejemplo de ello se tiene:

i) Caso de la partición del  $\text{C}_3\text{A}$ :

Ejemplo 1º, el de las tortas P-1/M 60/40 y P-2/M 60/40, las cuales han de tener:

- igual cantidad de ettringita de origen  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la fracción (40% en peso) de puzolana M,
- distinta cantidad de ettringita de origen  $\text{C}_3\text{A}$  de la fracción (60% en peso) del cemento portland matriz P acompañante correspondiente,

habiendo de ser mayor la de la torta preparada con el cemento portland matriz P-1, que la preparada con el cemento portland matriz P-2, ya que el cemento P-1 aporta  $14,11\% \times 0,6 = 8,466\% \text{ C}_3\text{A}$  a su torta, mientras que el cemento P-2 aporta  $11,09\% \times 0,6 = 6,654\% \text{ C}_3\text{A}$  a su torta, de donde se deduce que, en teoría, la torta P-1/M 60/40 ha de tener mas ettringita total que la P-2/M 60/40, y por tanto alcanzar y mantener su máximo PAV por mas tiempo y en mayor cantidad, como así ha ocurrido en este trabajo.

Ejemplo 2º, el de las tortas 60/40 del resto de las puzolanas y el cemento P-1 dan unos valores de PAV mayores que los correspondientes al cemento P-2, por la misma razón anterior.

ii) Caso de la participación del  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ :

Es difícil en este caso del cemento portland matriz acompañante P, poner un ejemplo apropiado, por ello se han de buscar entre aquellos otros cementos de mezcla cuyo cemento matriz acompañante es un PY, al objeto de que en este caso la participación, en la ettringita total formada, sea escasa, muy escasa ó prácticamente nula, la de origen  $\text{C}_3\text{A}$ , ó ett-1f y viceversa la ett-rf, como bien pudiera ser el caso del cemento portland matriz

acompañante PY-4 ó PY-6, que se verán mas adelante, detenidamente. No obstante, y adelantando a propósito un poco de dicha interpretación, se puede exponer el siguiente ejemplo:

Sea cual fuere el grupo de tortas homónimas, 20/20 ó 70/30 ó 60/40, han de tener:

- distinta cantidad de ett-rf de la fracción puzolana "X" - correspondiente, e
- igual cantidad de ett-lf (escasa ó nula) de la fracción cemento portland matriz PY-4 ó PY-6 correspondiente.

Pues bien, al poder considerar como nula, y en cualquier caso constante a estos efectos, la ettringita de este segundo origen, ó del  $C_3A$ , las variaciones de PAV habidas serán imputables mayormente a la ettringita del primer origen, ó sea, de la  $Al_2O_3^{F-}$  correspondiente, las cuales al ser distintas en cada caso, de una familia de tortas a otra, por contener distinta puzolana, ponen en evidencia que tal contenido de  $Al_2O_3^{F-}$  engendrador de ettringita más o menos expansiva, según casos, correspondiente, ha de ser diferente de una "familia" a otra, es decir, de una puzolana a otra constituyente de la misma, habiendo, por tanto, de aumentar áquel, ó sea el valor del PAV, a igualdad de edad y cemento de mezcla, conforme aumente el cont. prop. de  $Al_2O_3^{F-}$  de la puzolana, como así ha ocurrido, por lo general, en este trabajo; pudiéndose, no obstante, señalar como única excepción explicable, la de la torta PY-6/A 60/40, en la cual su exceso de PAV habido sobre el resto de sus homónimas, PY-6/C 60/40 y PY-6/M 60/40, (pues las correspondientes D y O no deben poseer, al parecer, suficiente cantidad de  $Al_2O_3^{F-}$  para comportarse en parecido sentido y/o si suficiente cantidad de  $SiO_2^{F-}$  y/o  $Fe_2O_3^{F-}$  para evitarlo), presumiblemente seale imputable a otra causa adicional, (¿ ó no, quizás ?)  $C_3S$  distinta, a la de formación de  $\bar{SACH}$ , lo cual podría ser bastante probable dado que en la torta homónima de cemento portland matriz acompañante PY-4, no ha ocurrido tal discrepancia notable y si la generalidad anunciada, siendo en este caso el contenido de  $C_3S$  bastante menor, 58,19%, por lo que sus posibles nocivas consecuencias similares no se producirían como así ha ocurrido en este trabajo.

Unicamente resta por decir, que si dicha causa explicativa fuera la más probable, al no haberse originado tal grado de reactividad similar correspondiente en el caso de las tortas homónimas PY-6/C 60/40 y PY-6/M 60/40, pese a deber tener ambas mayores cantidades de  $Al_2O_3^{F-}$  que la A, ello habrá de serle imputado,

- o a que ambas dejen, después de las edades iniciales, menos cantidad de  $SO_3$  y/o portlandita residuales, por haberlos fijado mayoritariamente, en especial aquél, durante las mismas,

- . en el caso de la M por dicha causa, al ser la que más  $Al_2O_3^{F-}$  posee, y

- . en el caso de la C, por un mayor contenido de alcalinos expresados como  $Na_2O + K_2O$ , y su comportamiento dado en la interpretación VI.1.2.1.2.1º (c) Agrupación C,

- o bien a que la  $Al_2O_3^{F-}$  de la puzolana A es bastante menor que la de la C y M, pero el resto de  $Al_2O_3$ , la menos reactiva de la misma, mayor, la cual acabaría originando ettringita que daría al traste con la estabilidad de la probeta,

- o bien a ambas causas anteriores en mayor o menor medida.

2º.- A igualdad de puzolana.

- caso de los cementos de mezcla 60/20: Probablemente ello es debido a idéntica razón apuntada en el caso anterior 1º 1er. ejemplo.

- caso de los cementos de mezcla 70/30: Idem, sólo que en esta ocasión y para el caso de la puzolana M, pese a su, al parecer, alto contenido de  $Al_2O_3^{F-}$ , no es difícil discernir que tipo de ettringita, la de origen  $Al_2O_3^{F-}$  o la de origen  $C_3A$ , del cemento matriz acompañante P-1 ó P-2, es la mayoritaria - en este caso esta última -, en la consecución del máximo PAV alcanzable y su mantenimiento durante algunas edades del ensayo.

- caso de los cementos de mezcla 60/40: Idem, y además en esta ocasión y para el caso de la puzolana M, se puede reafirmar lo dicho anteriormente.

Finalmente y ante el hecho acaecido expuesto, en el último párrafo, cabe preguntarse si dicha tendencia a fraguar la torta correspondiente más temprano o más tarde, no

será por causa algo distinta a la del ataque selenitoso ....

¿ Carbonatación de poros pre-existentes consecuencia de ataque selenitoso previo ? ¿ Y donde al parecer no debieron producirse caso de la torta P-2/C 60/40 ? En cualquier caso dicha tendencia bien pudiera ser, al parecer, la búsqueda lenta hasta su consecución final de lo que Taylor (171) denomina "estabilidad interna dimensional del sistema".

- b) Caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente haya sido el PY-4 ó el PY-6:

Existen escasos datos para poder emitir, sin más, una hipótesis lo suficientemente razonada, no obstante, se puede decir que:

- a) Probablemente la excepción citada de la puzolana M sea debida una vez más a que la cantidad de  $Al_2O_3$  de dicha puzolana M es bastante mayor que la correspondiente a las puzolanas C, A, O y D, con lo cual se podría confirmar lo dicho al respecto en la interpretación VIII.1.2.2.2. (E) (F), 7\*1.2.1.

Por último y puesto que en casi todas las "familias" de cementos de mezcla de cementos portland matriz acompañante PY-4 ó PY-6, por lo general, las tortas más dañadas, en su caso, han sido la 80/20 y 70/30, pese a ser en las que menor cantidad de ettringita se ha formado en dicho orden, cabe pensar en la posibilidad de que la ya característica expansión destructiva inherente a la misma sea achacable tanto a la reacción que la forma cuanto más a las circunstancias mecanico-resistentes que la rodean durante su formación, siendo por lo general de pecres y algo violentas consecuencias, cuanto mayores sean aquellas. Y como confirmación de lo anterior, están las tortas hermanas 60/40 correspondientes, las cuales, dentro de lo malo, no han mostrado por lo general aspectos morfológicos tan deplorables, y ello pese a ser las que en teoría debiera formar más ettringita, en el caso de que el cemento matriz acompañante fuera el PY-4 ó el PY-6. Por lo que cabe pensar fundadamente que tal ettringita en su formación desde origen, no ha encontrado en el "entorno" de tales tortas 60/40 un medio tan fraguado como sus hermanas mayores, 80/20 y 70/30 anteriores, hecho perfectamente razonable por ser la que menor fracción PY porta, y confirmable por los resultados del PAV correspondientes obtenidos, por lo que tal ettringita, se habrá visto implicada de algún modo en el fraguado inicial y/o prolongado de tales tortas 60/40 citadas.

b) Por otra parte no hay que olvidar tampoco el papel tan importante que sobre todo a edades tardías puede jugar la portlandita liberada en la hidratación de la fracción PY correspondiente, pues es muy sintomático que casi todas las tortas de los cementos de mezcla preparados con el cemento PY-4 ó PY-6 y las puzolanas "A", "C" ó "M", sufren al final del ensayo, desde los 365 a los 730 días, un proceso de fraguado y endurecimiento, con o sin expansión destructiva previa; de aquí que por lo general los valores del PAV correspondientes aumenten en su caso, de los 365 a los 545 días y disminuyan desde estos últimos hasta el final.

Dicho fenómeno endurecedor al transcurrir por lo general, (excepto en las tortas 80/20 y 70/30 del PY-4/M y PY-6/M), con un pequeño escaso  $\Delta D$  de la torta correspondiente, ha de ser forzosamente de tipo colmatante, cuya causa bien pudiera ser:

- ó,  $\bar{S}ACH$  formados residualmente y/o
- ó, carbonatación de los anteriores y/o de la portlandita aún existente, por lo general, en las tortas.

c) Caso de que el cemento portland matriz acompañante haya sido el P-31, y las puzolanas la CV-10 y la CV-19:

Como se sabe las acciones sinérgicas más favorables según la interpretación VIII.1.2.2.2(E)(F)6º, son las derivadas de la máxima presencia de  $Al_2O_3^+$  y mínima posible, sin llegar a ser jamás nula, de  $C_3A$

Pues bien, en el presente caso, al ser constante la  $ett-1f$  en ambas tortas de tales cementos de mezcla por ser constante la fracción de  $C_3A$  de las mismas, 5,33%, lógicamente habrá de ser su  $ett-rf$  respectiva la que justifique las diferencias habidas entre los valores de PAV obtenidos de sus tortas respectivas, las cuales al ser más favorables inicialmente para el caso de la torta de la puzolana CV-19 justifican que en la misma deba de haber mayor "acción sinérgica", es decir, mayor velocidad de fraguado y endurecimiento y viceversa en la de la CV-10, como así ha ocurrido en este trabajo. Tal "acción sinérgica" superior ocurrida en la torta de la puzolana CV-19 que no en la de la CV-10 daría por consecuencia el aprisionamiento de gran parte

del  $C_3A$  inicial y/o  $Al_2O_3^{r-}$  residual del inicial, los cuales en especial el primero por mayoritario, podrían a edades más tardías actuar con apreciable violencia relativa, a modo de "cuña expansora", fragmentando más que reblandeciendo (caso de la torta de la puzolana CV-10 por todo lo contrario), la torta con su consecuencia pertinente, en especial, lo notorio de los valores del PAV correspondientes, los cuales aumentarían muchísimo y con prontitud ("cuasi de sopetón") en las rajaduras derivadas de la fragmentación de la torta que no en los fragmentos de la misma, como así ha ocurrido en este trabajo, véase Tabla 24.

De aquí que según ello el contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana CV-19 deba de ser menor que el de la CV-10.

Por último y antes de finalizar esta interpretación VIII.1.2.2.3. (E) (F), se ha de recordar que por la razón IV.6.1. (B), a), 4ª dada para la elección de este método de ensayo de L-A, TODOS los cementos de mezcla PA y/o PUZ preparados con cada una de las puzolanas seleccionadas, D, O, A, C, H, CV-10 y CV-19, sufrieron un período de curado bajo agua desionizada de 14 días, según prescribe la técnica operatoria del método en cuestión. Pues bien dicho período de tiempo de curado, puede considerarse de hecho como más que suficiente para semejarse a un perfecto y completo curado de un hormigón tradicional de cemento PA ó PUZ, antes de entrar en contacto con el medio sulfático agresivo, pese lo cual el mismo no logró evitar que todas las puzolanas, excepto la D, y en algunos casos solo la O, mostraran un malo o pésimo comportamiento en este ensayo, de distinta magnitud ante el mencionado ataque agresivo. Por lo que de ello cabe deducir que en contra de la opinión generalizada existente al respecto, un perfecto y completo curado de aquél no garantiza su resistencia y durabilidad ante dicho ataque agresivo, sino que la misma viene asegurada por el tipo de puzolana que lo constituya, y más concretamente, por la composición físico-química de la misma, en especial esta última, la cual se corresponde con la de la puzolana D preferentemente, seguida de la O a gran distancia.

Por lo tanto y en definitiva lo único que se consigue en este ensayo de L-A con dicho período de curado de 14 días, es potenciar el carácter,

- protector o "anti-sulfato" de la puzolana que por su especial composición química impide o dificulta el severo ataque en cuestión, caso de la D, o

- no protector ó "pro-sulfato" de la puzolana que por su especial composición química facilita el severo ataque en cuestión, caso del resto y en especial la M, residiendo como se verá, mediante el estudio comparativo con el método ASTM C 452, la potenciación de la acción protectora de la D, en que con el máximo curado adecuado de su cemento de mezcla PA ó PUZ correspondiente, éste puede estar constituido por un cemento portland de hasta cuatro unidades más en el contenido de  $C_3A$ , (8%-11%) que en caso contrario (5%-7%).

Finalmente del compendio global de esta interpretación VIII.2.2.7 se comprende fácilmente como al haber sido la puzolana referencial silícica D, la que, de todas las seleccionadas y comparadas a través de este método de ensayo de L-A, ha mostrado un mejor comportamiento en casi todos los casos (menos en la torta P-1/D 80/20, aunque su tardanza en manifestarse, 545 días, no menoscaba sino que certifica el dicho buen comportamiento de la misma), derivado de su actividad puzolánica, ha de serle adscribible a la misma, junto con la N, como se verá en el apartado VIII.2.2.2.3. (venidero), y más concretamente a la  $SiO_2^{\sim}$  que las constituye, la máxima representatividad de buen comportamiento y contenido de  $SiO_2^{\sim}$  de todas ellas. Asimismo y por todo lo contrario, el peor comportamiento, a la M, y más concretamente a su  $Al_2O_3^{\sim}$  constitutiva, la máxima representatividad de mal comportamiento y contenido de  $Al_2O_3^{\sim}$  de todas ellas, no pudiéndose precisar ni diferenciar en cambio, nítidamente mediante este trabajo,

- si por su "calidad" ... ¿activa ó reactiva ?,

- si por su "cantidad", ó

- si por ambas anteriores a la vez, en mayor o menor grado.

respectivas. Y quizás del mismo modo, otro tanto hubiera debido ocurrir con una puzolana referencial férrica, tal como Goetita y/o Nontronita y/o Trevorita, etc., adecuadamente preparada(s), pero que difícilmente se emplearán en la industria de los conglomerantes hidráulicos y sus afines; puesto que su explotación a través de la metalurgia extractiva, las hace mucho más rentables en ésta que en aquella, y al igual que ocurre,

- en la correspondiente del aluminio, con minerales diversos, bauxíticos, caolíníficos, etc., de elevado contenido de  $Al_2O_3$ , y

- en la correspondiente de la cerámica, porcelana, gres, etc, con arcillas diversas.

Y por último, al resto de las puzolanas, O, A, C, CV-10 y Cv-19,, se le han de adscribir unos contenidos de  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  intermedios en los de las dos primeras D y M, debiendo de ser lógicamente las más abundantes del mercado.

De donde se deduce en definitiva cómo mediante este método acelerado de ensayo de L-A, se puede conocer el comportamiento de una(s) Puzolana(s) dada(s) ante el ataque de los iones sulfato, pudiéndolas por tanto clasificar en función del mismo y aconsejar por tanto su uso más adecuado para un fin concreto, en cuyo caso podría(n) recibir lógicamente el calificativo o apelativo adicional de ADECUADAS ó APROPIADAS para dicho fin.

Del mismo modo se comprende que la principal causa - además de la circunstancial apuntada en la interpretación VI.1.2.1.2.1<sup>2</sup> (c) Agrupación G referente a la presencia conjunta en cantidades precisas de  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$  y su influencia en el medio, caso de la puzolana C -, de la disminución de CaO (mM/l) en la fase líquida del ensayo de Frattini, es íntegramente aplicable a las tortas de los cementos de mezcla PA y PUZ, pero en este caso la fijación de CaO por parte de la puzolana de turno y en este medio tan selenitoso, ha tenido que ser, según la conclusión VII.4.2.3<sup>2</sup>, para formar en principio ett-rf y quizás los sulfato-ferritos de calcio hidratados correspondientes, en su caso, que no sulfato-silicatos homónimos respectivos, aunque los dos primeros en cantidades bien distintas de una o otra puzolana, siendo ello lo que en definitiva las caracteriza. Y todo ello de tal modo que en todas y cada una de las tortas correspondientes preparadas, se pueden verificar, en su caso, fenómenos más o menos destructivos ocurribles en las mismas al unísono pero con distinta velocidad,

- uno debido a la formación mayoritaria, por lo general, de ett-rf sobre ett-lf, que es rápido y efectivo, originándose mayormente a las edades iniciales y alguna(s) siguiente(s) del ensayo,
- otro debido a la formación potencialmente mayoritaria por lo general, de ett-lf sobre ett-rf, que es al parecer el menos rápido y mas efectivo que el anterior, originándose al principio, escasa y solapadamente con el primero, y posteriormente, a edades intermedias y alguna(s) final(es), en su mayor parte, por no decir casi en exclusiva,



- Otro debido a la carbonatación de la portlandita permanentemente excedentaria durante todo el ensayo, que es, al parecer, mas lento y constante, pero no por ello menos efectivo que los dos anteriores, ocurrible por lo general, durante todo el ensayo, y quedando,

. solapado por ambos durante las edades iniciales e intermedias, . y al descubierto y en ocasiones quizás casi en exclusiva durante las finales del mismo, causa por la cual se aprecian mas claramente sus probables malas consecuencias a bastante mas largo plazo que en los anteriores, cuando ya para entonces ambas hayan finalizado. De aquí que para tratar de obviarlo lo mas posible, en favor de los primeros, se haga aconsejable para averiguar el carácter<sup>3\*</sup> de una(s) puzolana(s) dada(s) a través de este método de ensayo de L-A, el empleo de un cemento portland del menor contenido posible de  $C_3S$ , y viceversa de  $C_2S$ , siendo por tanto el ideal el de valor nulo de aquél y máximo de éste. Esta deducción junto con la correspondiente al contenido de  $C_3A$  deberá de ser el menor posible, siendo el ideal el de nulo contenido, para que la puzolana problema pueda manifestarse mejor y mas claramente su verdadero "carácter", señal de su mas que probable comportamiento, habrán de ser las que condicionen el cemento portland a elegir para el estudio adecuado de la misma a través de los correspondientes apartados del capítulo XII Aplicaciones que se propone, como se verá mas adelante, a la luz de este trabajo, y por último,

- otro debido a la posible formación de ettringita de muy lenta formación o de origen el ión  $Al^{3+}$  del  $C_4AF$  y sus s.s., de cada cemento portland, el cual se originaría en paralelo con el anterior, carbonatación de la portlandita, aunque a distinta velocidad, pudiendo ser quizás el verdadero causante de la nocividad inculpada errónea y generalmente al mismo en exclusiva, y que sería por tanto mejor y mas detectable en el caso de los cementos portland PY que en el caso de los P.

Por último se ha de destacar el probable interés tecnológico mostrado por el parámetro PAV para el caso de los cementos de mezcla PA y/o PUZ o mejor la(s) puzolana(s) que lo(s) conforme(n), ó no, pues según

- el tipo de cemento portland común, P ó PY, que acompañe a aquella(s)  
- y la edad del ensayo que se considere,

se ha obtenido que,

- en el caso de que el mismo ha sido un P de elevado contenido de  $C_3A$  ( $>11,00\%$ ) la clasificación obtenida de las puzolanas D, O, A, C y M, a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, en función del valor del PAV de su torta respectiva, de menor a mayor valor por este orden, a las edades iniciales del ensayo de 1, 7 y/o 14 días, a lo sumo, del ensayo, ha resultado ser

% $C_3A$ del cemento portland matriz acompañante común $> 11,00\%$		
<PAV <	D < O < A < C < M	de 1 a 14 días

- en el caso de que el mismo ha sido un P de mediano contenido de  $C_3A$  (del  $5,00\%$  al  $8,00\%$ ), la clasificación de las puzolanas CV-10 y CV-19, a igualdad de cemento de mezcla PUZ 70/30, en función del valor del PAV de su torta respectiva, de menor a mayor valor por este orden, a las edades de 1 a 180 días, a lo sumo, del ensayo, ha resultado ser

% $C_3A$ del cemento portland matriz acompañante común del $5,00\%$ al $8,00\%$		
<PAV <	CV-19 < CV-10	de 1 a 180 días

- en el caso de que el mismo ha sido un PY de contenido prácticamente nulo de  $C_3A$  ( $= 0,00\%$ ), la clasificación de las puzolanas D, O, A, C y M, a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, en función del valor del PAV de su torta respectiva, de menor a mayor valor por este orden, a la(s) edad(es) final(es) del ensayo de 365 a 730 días, ha resultado ser

% $C_3A$ del cemento portland matriz acompañante común $= 0,00\%$		
<PAV <	D < O < A < C < M	de 365 a 730 días

es decir, todas ellas coincidentes con la que se obtendría en función

- del  $Al_2O_3$  (%) ó  $SiO_2$  (%) /  $Al_2O_3$  (%) ó  $MF$ ,
- del ensayo de Fratini,
- de la POP, y
- del contenido probable relativo de  $Al_2O_3^{F-}$  (%) de cada una de ellas respecto a las demás.

Por último y antes de finalizar esta interpretación VIII.1.2.2.3 (E) y (F), se ha de decir por tanto que según este método acelerado de ensayo de L-A (y los métodos ASTM C 452 e H-1 que se verán mas adelante) TODOS los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con todas y cada una de las puzolanas (H), O, A, C, CV-10 y CV-19, han mostrado por lo general y a igualdad de todo lo demás, un comportamiento ante el ataque de los iones sulfato intermedio al de las puzolanas referenciales silícica D y aluminica M, pero no con la generalidad positiva o negativa en RS de las mismas, aunque si al menos con cierta semejanza de comportamiento,

- con la primera, D, (caso de la H), o

- con la segunda, M, caso del resto,

en mayor o menor medida, y por último haciendo podido llegar a superar, o no, en ambos casos o solo uno de ellos, las especificaciones correspondientes para poder ser calificados de elevada o moderada RS, y al contrario, de baja o escasa RS.

-----  
\* NOTA

Coincidiendo con los resultados de Fratini en los que se puede ver que en los cementos de mezcla PA y PUZ de cemento portland matriz PY-4 y PY-6 respectivamente, a igualdad de edad y cemento de mezcla, la puzolana D fija mas CaO del medio a 7 y 28 días.

-----  
2\* NOTA

Confirmable por el PAV, ya que si fueran iguales ambos contenidos de  $Al_2O_3$  de C y M, hubiesen originado a igualdad de todo lo demás, igual ó similar PAV en sus tortas respectivas, y eso, como se verá, no ha ocurrido, sino todo lo contrario, con mayoría de los de la M sobre la C.

VIII.1.2.2.5.- Ejemplos prácticos de los Ocho Cementos Puzolánicos Industriales, elegidos al azar para la realización de este trabajo, y ensayados según el método de L-A, véase Tabla 73.

Discusión VIII.1.2.2.5.

1ª.- Según este método de ensayo de L-A, los ocho cementos PUZ industriales han resultado tener distinto comportamiento ante el ataque de los iones sulfato, de modo y manera que de los mismos, - 2 (25,00%), PUZ-7 y PUZ-8, han resultado ser de moderada RS, puesto que el  $1,25\% < 4\phi_{28} < 4,00\%$ , y - 6 (75,00%), el resto, han resultado ser de baja o escasa RS puesto que el  $4\phi_{28} > 4,00\%$  todo ello según la especificación reactualizada, 1,25% y propuesta, 4,00%, respectivamente, a raíz de la interpretación VIII.1.2.2.3 (L-A), y su Tabla 18 resultante.

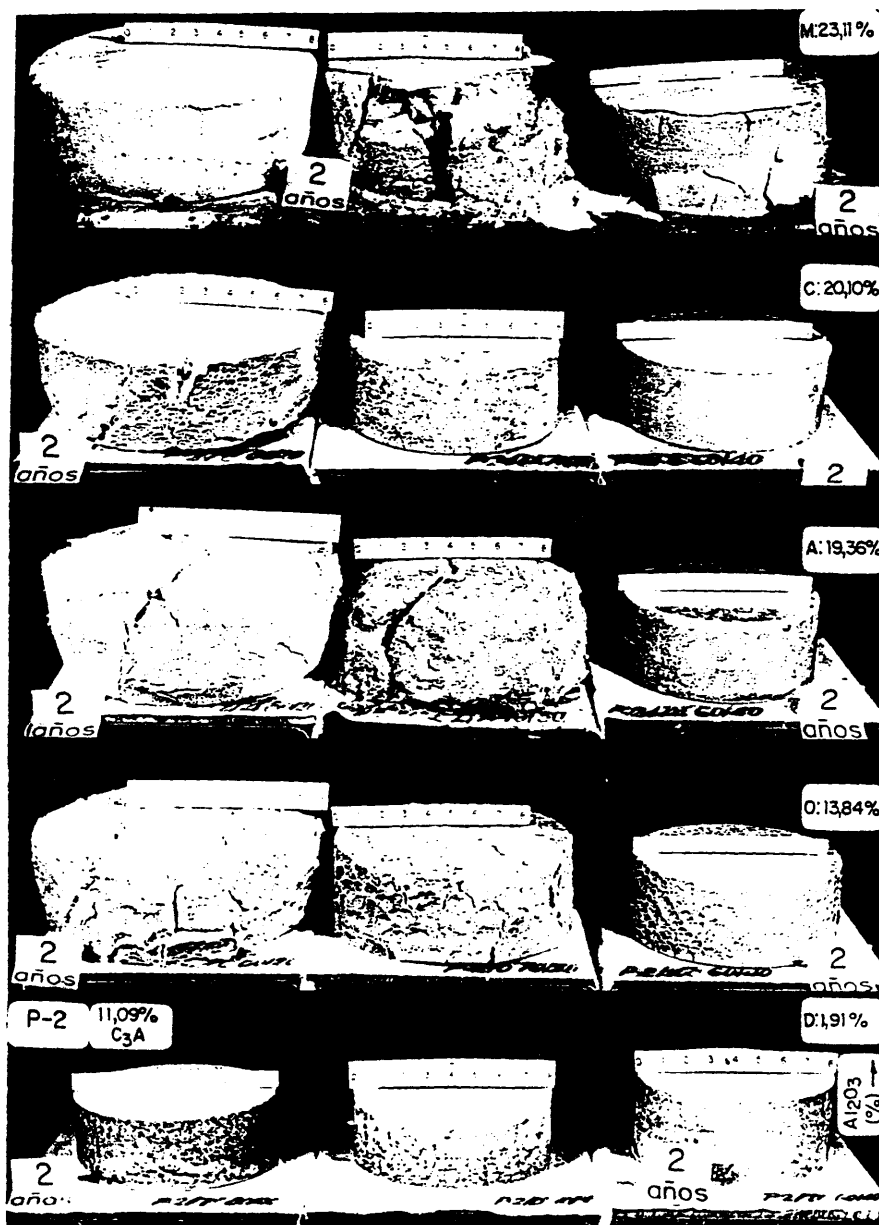
A continuación cabe citar aquí la discusión e interpretación VIII.2.2.2.9 (ASTM C 452) venidera.

2ª.- En este método de ensayo, L-A, las clasificaciones que se obtienen a las edades iniciales de 28 y 90 días y final de 730 días, de los ocho cementos PUZ industriales en función del valor del  $4\phi$  (%) de su torta respectiva, han resultado ser bastante coincidentes entre sí, véase Tabla 73, pero nada en absoluto con las correspondientes obtenidas mediante los parámetros AQ (contenido de  $Al_2O_3$  (%) parcial, según el RC-75 (1)), y/o MF, y ensayo de Fratini (véase al respecto la razón justificativa correspondiente a esta discusión dada en la interpretación de la Discusión VIII.2.2.2.9.3ª).

3ª.- Por último y antes de finalizar este apartado VIII.1.2.2.4., se ha de decir por tanto que según este método acelerado de ensayo de L-A (y los métodos ASTM C 452 e H-1, que se verán más adelante), los ocho cementos PUZ industriales han mostrado igual grado de variabilidad de comportamiento, en este caso de moderada a escasa o nula RS, que los cementos de mezcla PA y/o PUZ preparados con cada una de las puzolanas seleccionadas para la realización de este trabajo, D, (N), O, A, C, M, CV-10 y CV-19, respectivamente, e igualmente ensayados.



Fot. 3



Fot. 4

VIII.2.- Estudio del Comportamiento Frente al Ataque de los Iones Sulfato de los Cementos P, PY, PA, PUZ y PUZ Seleccionados, Elegidos y/o Preparados para este Trabajo, mediante el Método Acelerado de Ensayo ASTM C 452.

VIII.2.1. Técnica Operatoria

Se ha seguido la técnica operatoria descrita en la norma ASTM C 452-68 (215) y ASTM C 452-75 (239), respectivamente, las cuales son las dos versiones habidas hasta la fecha del método acelerado de ensayo ASTM C 452 en cuestión, diferenciables únicamente en la forma de determinación de agua de amasado ó relación a/c en cada una de ellas, que es como sigue:

- norma ASTM C 452-68: se determina en porcentaje, de forma que el mortero correspondiente fluya entre 100% y 115% (mediante el método de la "mesa de sacudidas" ó del "escurrimiento (flow) constante"); la misma se representará en adelante por  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cnte.}$  ó  $\frac{a}{c} = d$  ó  $d$ .
- norma ASTM C 452-68: la fija expresamente en 0,485; la misma se representará en adelante por  $\frac{a}{c} = c = \text{cnte.}$  ó  $\frac{a}{c} = c$  ó  $c$ .

No obstante y de forma muy resumida se puede decir que este método acelerado de ensayo, tiene por objeto determinar la expansión que experimentan probetas ó prismas de 25,4x25,4x285,75 (1" x1" x11¼") de mortero 1:2,75, hechas con una mezcla conglomerante, cemento a ensayar más yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), en tales proporciones que la misma tenga un contenido porcentual ponderal del 7,0% de  $\text{SO}_3$ .

Por otra parte y antes de continuar adelante se ha de hacer constar que a raíz de lo expuesto en el apartado IV.3.2.2., al aplicar ambas versiones del método en cuestión ASTM C 452 a TODOS los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con las puzolanas D y N respectivamente, se ha observado:

- a) Que los valores de la relación a/c, a la hora de aplicarles la versión ASTM C 452-68, resultaron ser elevados o muy elevados, - véase a propósito la Discusión VIII.2.2.2.1, 10ª venidera.
- b) Que durante la fase de enmoldado y primeros momentos del curado de las probetas (y estando éstas aún en sus moldes), en cámara húmeda conforme prescribe la Sec. 9 de la norma ASTM C 109-77 (266) se producía una exudación rauda de agua de las mismas que se posaba, cubría y mantenía sobre ellas, y

c) Que el valor 0,485 de la relación a/c a la hora de aplicarles la versión ASTM C 452-75, creó excesivas dificultades de amasado del mortero, las cuales se subsanaron, en gran parte, prolongando la fase final del mismo de 1 minuto a  $285 \pm 10$  rpm, a 8 ó 6 ó 4 minutos para las mezclas 60/40, 70/30 y 80/20 Cemento P ó PY/ Puzolanas D ó N, respectivamente. Y ello porque en vista de la exudación de agua de amasado producida en el punto anterior b), y puesto que tales puzolanas morfológicamente son estuches vítreos huecos y porosos, éstos, podrían operar del siguiente modo:

1º.- Adsorberían agua de amasado, la cual a través de los poros de sus tecas pasarían al interior del frústulo, impidiendo la ejecución del amasado; propiamente dicho, de aquí que para facilitar lo hubiera de añadirse más agua, superando por lo general, de este modo las cantidades normales que aconseja la práctica común ( $0,60 < \frac{a}{c} = d \neq \text{cte.} < 1,0$ ).

2º.- Puesto que dicho proceso de adsorción presupone la existencia de un movimiento acelerado que afecta a dicha agua atrayéndola hacia el interior del frústulo, ésta, en su marcha, humectaría a todas las partículas que encuentre a su paso, que en el caso de ser de cemento P ó PY acompañante de dichas puzolanas D ó N, se traducirá en la hidratación de las mismas con la consiguiente formación de portlandita que acabará por saturar a aquella.

3º.- Según lo anterior podría haber caparazones de diatomeas rellenos de agua o de disolución de portlandita:

3º.1.- En el primer caso y puesto que los geles de sílice son estables y, con el tiempo, si están saturados de agua sufren contracción (Sinéresis), no es de esperar colmatación alguna, (271).

3º.2.- En el segundo caso, disolución de portlandita, y según Lapoujade y Vogelin (167) ó Hara e Inque (168), se darían las condiciones óptimas para formarse diversos geles tobermorfíticos según las condiciones existentes de concentración iónica en la fase líquida, temperatura de la misma, estado de hidratación, tiempo de contacto, etc. etc. cuyo carácter de "vaso poroso" que confieren a su conjunto, según Veronelli (271), si hay mucho  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  - como puede ser el caso que nos ocupa de las puzolanas D y N-, la membrana tanto



interior como exterior, por este orden de más a menos, de las tecas del frústulo será muy rica en  $\text{SiO}_2$  y por lo tanto impermeable, por lo cual no tendrá lo "poroso" inicial que colmatarse por la misma; por el contrario cuando haya mayor concentración de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en la fase líquida, la membrana, tanto exterior como interior, por este orden de más a menos, de las tecas del frústulo, será más adelante cálcica y por lo tanto bloqueará, por ser impermeable, los poros de la matriz tobermorítica que rodea a la partícula, originando la colmatación correspondiente como en el caso anterior aunque por material distinto.

4º.- Estos hechos anteriores dan pie a pensar con fundamento que tras la colmatación gradativa del espacio interior de los frústulos de las diatomeas por dichos fenómenos citados, la fase líquida aún sobrante en su interior, será empujada al exterior por idéntico camino pero en dirección opuesta a cuando penetró; lo cual se traducirá, en todo el conjunto de la masa del mortero amasado, en una "exudación" de dicha fase líquida que es la que aparecería sobrenadante sobre las probetas de mortero a lo largo de los primeros instantes del curado en cámara húmeda de las mismas, véanse a propósito las interpretaciones VIII.1.2.2.1. (E), B\* y VIII.2.2.2.1.2. C), que no contradicen esta hipótesis.

Viéncose todo ello además coadyuvado por el calentamiento de la disolución de portlandita dada la notable exotermicidad derivada de la hidratación selenitosa de la fracción clinker del cemento portland anhidro presente en cada caso, con las consecuencias exudativas consiguientes.

Como conclusión final de esta posible explicación dada, se obtiene que el citado fenómeno "exudativo" se deberá producir tanto con un agua de amasado potencialmente alta, caso de la  $d = \text{ente. } (0,8 < d < 1,0)$ , como con un agua de amasado potencialmente baja, caso de la  $d = \text{ente. } = 0,485$ ; por lo que en este último caso con sólo prolongar la fase final del amasado por más de 1 minuto se deberá originar durante la misma y aún en el propio cuenco donde se amasa dicho mortero, todo o parte del proceso exudativo acuoso anterior, el cual se aprovecharía para facilitar algo más de lo que lo era al principio, el propio proceso del amasado y mejorar por tanto la trabajabilidad, sin llegar a lo ideal, del mortero en cuestión, como así ha ocurrido en la realidad, gracias a lo cual se pudo llegar a enmoldar los morteros de las puzolanas D y N antes citadas.

Finalmente y puesto que en cuanto al agua de conservación de las probetas la norma ASTM C 452 especifica que la misma no debe sobrepasar en cinco veces el volumen del número de probetas conservadas en el recipiente. Dicha condición se cumplimentó haciendo que dicha relación fuera igual a cuatro

veces, con lo que,

- para conservar tres probetas de 1"x1"x11¼" se necesitaron 2212,25 cm<sup>3</sup> de agua potable filtrada a t° de 23°±1,7°C, y
- para conservar 12 probetas de 1x1x6 cm se necesitaron 288,00 cm<sup>3</sup> de agua desionizada, hervida y enfriada a temperatura a t° de 23°±1,7°C

No obstante, y como por razones obvias ambos tipos de aguas de conservación eran diferentes, se realizó previamente un estudio comparativo de ambas para confirmar que la última no afectaba en nada a la expansión de las probetas. Para ello de cada cemento portland P-1, P-31 y PY-6, ensayado conforme indica la versión ASTM C 452-68, (por las razones que se verán en su momento), respectivamente, se sumergieron tres probetas en 2212,25 cm<sup>3</sup> de agua potable filtrada y otras tres en agua desionizada, hervida y enfriada. Los resultados experimentales obtenidos figuran en la Tabla 90.

En cuanto a las "Consecuencias" cabe decir que no hubo alguna destacable, pues como cabía esperar los resultados habidos con tales aguas de conservación empleadas, la potable filtrada según la norma ASTM C 452-68 y la desionizada, fueron concordantes, oscilando su Coeficiente de Variación o Varianza (véase pag. 310) de bueno a excelente (158), valores ambos entre los cuales quedaron comprendidos los correspondientes a los  $\bar{\Delta L}$  de las probetas del resto de los cementos igualmente ensayados.

VIII.2.1.1.- Aparatos y/o Técnicas Instrumentales y/o Analíticas para la determinación de cada uno de los parámetros considerados en cada tipo de probeta.

Los aparatos y/o técnicas instrumentales y/o analíticas empleadas para la determinación de cada uno de los valores de los distintos parámetros considerados, han sido los siguientes:

- A) En probetas de 1" x 1" x 11¼" (25,4 x 25,4 x 285,75 mm):
- a) Para determinar el Incremento Porcentual de Longitud,  $\bar{\Delta L}$  (%): se ha utilizado un medidor de longitudes ó "comparador", marca ICON que aprecia 0,0001", según prescribe expresamente la norma ASTM C 490-74 (268).
  - b) Para determinar el tiempo empleado: se ha utilizado un medidor de velocidad de pulsaciones ultrasónicas marca PUNDIT, habiendo sido la frecuencia de transmisión de impulsos empleada de 50 Kc/sg.

B) En probetas de 1 x 1 x 6 cm:

- a) Resistencias Mecánicas a Flexotracción, RMF,: se ha utilizado una máquina NETZSCH GERATEBAU GMBH SELB, modelo T y P. 6.111.2, con una capacidad máxima de 24 Kp y sensibilidad 0,1 Kp.
- b) Resistencias Mecánicas a Compresión, RMC,: se ha utilizado una prensa marca TONINDUSTRIE, de 20 Mp de capacidad máxima, pero preparada con escala de 4 Mp cuando se creyó necesario, y velocidad de carga la normalizada en el Pliego RC-75 (1).
- c) Para determinar la Porosidad: se ha empleado el método descrito por Paris y Baquedano (276) dándose los resultados en tanto por ciento (%).
- d) Para determinar la  $SO_4^{2-}$  lcp: se ha empleado el método descrito por Hurtado (284), dándose los resultados en g.  $SO_4^{2-}$  l., según convino.

#### VIII.2.2.- Resultados Experimentales Obtenidos

Antes de empezar a exponer, discutir e interpretar los valores del parámetro  $\bar{\Delta}L$ , correspondiente a cada cemento portland ó mezcla PA y/o PUZ así ensayado, se desea hacer saber que todos los Coeficientes de Desviación respectivos han oscilado generalmente entre el 0,12% y el 12,78%.

##### VIII.2.2.1.- De los doce Cementos Portland, 6 P y 6 PY solos :

Antes de empezar a exponer, discutir e interpretar los valores del parámetro  $\bar{\Delta}L$  correspondientes a cada cemento portland, P y PY así ensayado, se desea hacer saber que por consecuencias de la interpretación VIII.2.2.4 venidera y por las razones allí apuntadas que, los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, seleccionados para la realización de este trabajo, se ensayaron únicamente conforme a la versión del método norteamericano ASTM C 452-68.

##### Discusión VIII.2.2.1

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$ , véase Tabla 26.

1.- Sea cual fuere el cemento portland de los doce, 6 P y 6 PY, seleccionados y así ensayados, la evolución de los valores de este parámetro  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respectivas a lo largo de todo el ensayo, ha sido el de aumento constante, pero en

distintia cuantía, según las edades consideradas del mismo, y el contenido de  $C_3A$  de aquél, de modo y manera que por lo general - para el caso de los cementos P, tal aumento gradativo se puede calificar,

- . de notable, hasta las edades de 60 ó 90 días, siendo tanto mas notable conforme mas inicial es la edad del ensayo, y  $C_3A$  posee el cemento y viceversa, y
  - . de escaso, desde las edades antes citadas, hasta la de 730 días, siendo tanto mas escaso cuanto mayor es la edad final del ensayo en cuestión, hasta la de 545 días, y menor el contenido de  $C_3A$  del cemento, pues a la edad de 730 días dentro de lo escaso, lo ha sido menos en todos ellos, y
- para el caso de los cementos PY, ocurreles prácticamente durante todo el ensayo, tanto mas esto último citado, cuanto menor es su contenido de  $C_3A$ , y viceversa; siendo no obstante el salto sufrido en sus valores de  $\bar{A}L$  respectivos desde la edad de 7 a la edad de 14 días, el menos escaso de todos.

Por lo tanto y en definitiva, se puede decir con aproximación cierta que los  $\bar{A}L$  de las probetas de los cementos portland ensayados sufren un "frenazo" en la creación, evolución y desarrollo de sus valores correspondientes de  $\bar{A}L$  a una determinada edad del ensayo, por lo general, tanto mas pronta cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento ensayado, y viceversa.

Por otra parte y en cuanto a los valores correspondientes al parámetro derivado  $Vcl$ , la creación evolución y desarrollo de los mismos a lo largo de todo el ensayo, es de aumento sinuoso hasta llegar a un valor máximo alcanzable,

- tanto mas pronto cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$ , para cementos de elevado contenido del mismo, caso del P-1, P-2 y P-4, precedido de al menos un valor mínimo correspondiente que se alcanza por lo general a una edad intermedia entre la de aquél y la inicial de 7 días, aunque mas comunmente entre las edades de 14 y 28 días ambas inclusive,

tras el cual se produce una disminución progresiva y continuada del mismo hasta alcanzar por lo general, su práctica nulidad. Este hecho ocurre tanto más directa y claramente desde la edad del ensayo de 7 días -edad ésta a la que se suele alcanzar en estos casos (menos en el del P-5) el valor máximo de  $Vcl$ -, cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  -a partir del 9,30% del P-32 inclusive- del cemento portland ensayado, y viceversa, en cuyo caso ocurre como es natural lo dicho al efecto antes.

No obstante, sea cual fuere el cemento P ó PY ensayado, el valor máximo absoluto y relativo de la Vcl de sus probetas se alcanza por lo general en los primeros 90 días del ensayo, pudiendo llegar a 7 para el caso de los PY y algunos P, en cuyo caso, tal valor, a dicha edad, suele aumentar con el contenido de  $C_3A$  del cemento portland, manteniéndose esta generalidad cada vez menos conforme transcurren las edades de 90 ó 120 días, deja de cumplirse por hacerse los valores prácticamente nulos en todos ellos, aunque no obstante muy escasamente mayores los correspondientes a los cementos PY.

2\*.- Como era de preveer, y salvo ciertas excepciones que se verán más adelante, las clasificaciones obtenidas de los 12 cementos portland, 6 P y 6 PY, así ensayados en función del valor del  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respectivas, de mayor a menor valor por este orden, a las edades fundamentales del ensayo de 14, 28, 365 y 730 días, han sido las siguientes, véase Tabla 27, las cuales han resultado ser algo más coincidentes con la obtenida mediante su contenido de  $C_3A$  respectivo, que las correspondientes obtenidas mediante los métodos, L-A (ya visto), e H-1 (se verá), respectivamente.

3\*.- A pesar de las clasificaciones anteriores obtenidas, se ha de destacar la existencia de los siguientes casos concretos, al parecer, anómalos:

3\*1.- Cementos P-2 y P-4: Hasta la edad de 14 días, los  $\bar{\Delta}L$  del cemento P-4 han sido mayores que los correspondientes al P-2, pese a tener éste un mayor contenido de  $C_3A$ , 11,09%, que aquél, 10,71%, lo cual da pie para poder calificar a esta anomalía de parcial pues sólo se produce durante las primeras edades del ensayo.

3\*2.- Cementos PY-5 y PY-1: Hasta la edad de 60 días, los  $\bar{\Delta}L$  del cemento PY-1, han sido mayores que los correspondientes al PY-5, pese a tener éste un mayor contenido de  $C_3A$ , 4,50%, que aquél, 3,33%, lo cual da pie también para poder calificar a esta anomalía de parcial pues sólo se produce durante las primeras edades del ensayo.

3\*3.- Cementos PY-4 y PY-6: Tanto a las primeras edades (desde 14 días a 28 días) como a las últimas (desde los 180 días hasta el final del ensayo), del ensayo, los  $\bar{\Delta}L$  del cemento PY-6 han sido mayores que los correspondientes al PY-4,

y en teoría deberían haber sido iguales, pudiéndose generalizar que han sido, más que menos, las edades donde se ha cumplido lo citado; de aquí que por ello se pueda calificar a esta anormalidad de "casi total" pues se produce durante las del principio y finales del ensayo es decir, la mayor parte del ensayo.

41.- El valor de la relación  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$  osciló en este caso entre 0,48 y 0,51.

Discusión VIII.2.2.1. (cont.)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta$ RMF,  $\Delta$ RMC,  $Vc\Delta$ RMF y  $Vc\Delta$ RMC, véase Tablas 28 y 29.

Antes de entrar en la discusión de los valores de los parámetros - RMF y RMC se ha de hacer constar que los coeficientes de variación obtenidos de los mismos, tanto en este caso como en los venideros de cementos de mezcla PA y/o PUZ, están en la pag. 338.

11.- Sea cual fuere el cemento portland de los doce, 6 P y 6 PY, seleccionados y así ensayados, la evolución de los valores,

- absolutos, de los parámetros RMF y RMC,
- relativos, ó incrementos porcentuales correspondientes,  $\Delta$ RMF e  $\Delta$ RMC, y
- de las velocidades de crecimiento de los mismos,  $Vc$ RMF y  $Vc$ RMC, de sus probetas respectivas, a lo largo de todo el ensayo, ha sido,
- caso de los primeros, de aumento generalizado y ligeramente sinuoso, que finalizó en ligera disminución para los cementos P, que no para los PY,
- caso de los segundos, el de aumento generalizado y ligeramente sinuoso para el caso de los cementos PY de escaso a nulo contenido de  $C_3A$ , y el de aumento, seguido de disminución, para el resto, variando de uno a otro cemento ensayado, la edad correspondiente de consecución de su valor máximo respectivo, pero que, en general, se suele alcanzar tanto mas pronto cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento PY ensayado; siendo bastante destacables los hechos siguientes,
- . que alcanzado, o no, en su caso, dicho valor máximo de  $\Delta$ RMF e  $\Delta$ RMC, las variaciones sufridas en los mismos - por lo común a partir de una edad del ensayo intermedia distinta

pero aproximada—, son mucho mayores que las sufridas a las edades iniciales, de modo y manera que, en cierta medida, se podría decir que se mantienen aproximadamente constantes hasta la edad final del ensayo, y

. que tales aumentos tan notables de  $\Delta R_{MF}$  e  $\Delta R_{MC}$ , sufridos en todos los casos durante las edades iniciales del ensayo, (por lo general hasta la edad de 60 ó 90 días), han sido tanto mayores cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, y

- caso de los terceros, el de disminución rápida, generalizada y sinuosa hasta su práctica nulidad en todos los casos, pero con el hecho notable de que las máximas disminuciones se alcanzan, por lo común, durante los primeros 28 días del ensayo.

2\*.- Por lo general, a igualdad de edad,

- cualquiera del ensayo, para el caso de los parámetros  $R_{MF}$  y  $R_{MC}$   
- de 7 días, para el caso de los parámetros  $\Delta R_{MF}$  e  $\Delta R_{MC}$ , y  
- de 7 (la más común), ó 14 ó 21 ó 28 días, para el caso de los parámetros  $Vc\Delta R_{MF}$  y  $Vc\Delta R_{MC}$ , respectivamente.

los valores de tales parámetros suelen aumentar con,

- el aumento, caso de los parámetros  $R_{MF}$  y  $R_{MC}$ ,  
- la disminución, caso de los parámetros  $\Delta R_{MF}$  e  $\Delta R_{MC}$ , y  $Vc\Delta R_{MF}$  y  $Vc\Delta R_{MC}$ , respectivamente,

del contenido de  $C_3A$  de cemento portland ensayado, siendo intrascendentes las clasificaciones que se pudieran obtener en función de los valores de los mismos y en función del citado contenido, por las excesivas discrepancias habidas entre ambos.

#### Discusión VIII.2.2.1 (cont.)

(G) Parámetro: Porosidad, véase Tabla 28.

1\*.- Sea cual fuere el cemento portland de los doce, 6 P y 6 PY, seleccionados y así ensayados, la evolución de los valores de este parámetro Porosidad de sus probetas respectivas, a lo largo de todo el ensayo, ha sido de sinuosidad regular relativamente semejante, de uno a otro cemento, y periodo distinto, aunque también relativamente constante en la mayoría de los casos, durante el mismo, de modo y manera que :

- desde el momento inicial (desenmoldado de la probeta) hasta la edad de,
    - . 7 días, en los cementos P-1, P-31, P-5, PY-5, PY-1 y PY-2,
    - .14 días, en los cementos P-4, P-32, PY-3 y PY-6,
    - .21 días, en el cemento P-2, y
    - .28 días, en el cemento PY-4,disminuye en todos los casos, estando tal disminución comprendida entre el 0,49% (P-31, 18,66%-18,17%) y el 3,79% (PY-1, 19,92%-16,13%), siendo, por lo general, tal mínimo respectivo el menor de todos los que alcanzare en su caso su autor, hasta el máximo correspondiente siguiente.
  - desde la edad del mínimo respectivo anterior en adelante, aumenta hasta llegar a un máximo variable según el tipo de cemento ensayado, pero que, en general, se alcanza entre las edades de 60 y 365 días, ambas inclusive, excepto en el caso del cemento PY-6, que se alcanza a la edad de 21 días, siendo destacable que para el caso de los cementos P-1, P-2, P-4, P-32 y P-31, existe mayor proximidad, entre sí, en la fecha de consecución de su máximo de porosidad de sus probetas respectivas que en el resto, y
  - desde la edad a la que se alcanza el máximo de porosidad respectivo anterior, hasta final del ensayo, disminuye progresivamente.
- 2ª.- Se puede decir con cierta aproximación, que a igualdad de edad del ensayo, el contenido de poros de las probetas respectivas aumenta con el contenido de  $C_3A$  del cemento P ó PY.
- 3ª.- Pese a las discusiones anteriores, se ha de destacar que, en general, el rango de variabilidad de los valores de este parámetro, obtenidos mediante esta técnica experimental, de las probetas correspondientes es muy escaso de un cemento portland a otro, ya fuere P ó PY.

#### Discusión VIII.2.2.1 (cont.)

(H) Parámetros:  $V_u$ ,  $\Delta V_u$  y  $V_c \Delta V_u$ , véase Tabla 30 y 28.

- 1ª.- Sea cual fuere el cemento portland de los doce, 6 P y 6 PY, seleccionados y así ensayados, la evolución de los valores de los parámetros  $V_u$ ,  $\Delta V_u$  y  $V_c \Delta V_u$  de sus probetas respectivas a lo largo de todo el ensayo, ha sido:



- Vu: de aumento mas o menos sinuoso durante todo el ensayo, aunque en el caso de los cementos portland P-1 y P-2, con la presencia apreciable de sendo(s) valor(es) máximo(s) y mínimo(s) que no menoscaban dicha evolución, no ocurriendo lo mismo en el caso del P-4 cuyos valores forman una campana de Gauss invertida.
  - $\Delta Vu$ : aproximadamente ocurre otro tanto que en los valores correspondientes al parámetro anterior, siendo destacable no obstante en todos los casos que, por lo general, los incrementos mayores del mismo se producen a las edades iniciales, durante los primeros 28 días del ensayo, que no a las finales del mismo.
  - $Vc\Delta Vu$ : ocurre lo contrario a los dos parámetros anteriores, pero siendo en todos los casos los valores correspondientes muchísimo mayores a la edad inicial de 7 días que en el resto de las edades del ensayo, a las cuales se puede considerar prácticamente despreciable.
- 2ª.- A igualdad de edad del ensayo, se cumple, para cada uno de los parámetros anteriores, que no existen diferencias muy notables entre los valores de los mismos de un cemento portland ensayado a otro. No obstante y puestos a sacar alguna diferencia se puede decir que los valores de la Vu,  $\Delta Vu$  y  $Vc Vu$  mayores, pertenecen, por lo general, a los cementos de mayor contenido de  $C_3A$  y viceversa, existiendo por lo general una correlación escasa entre cada uno de tales valores de Vu,  $\Delta Vu$  y  $Vc Vu$  y contenido de  $C_3A$  respectivo, aunque no obstante y dentro de lo escasa, siéndolo menos para los parámetros derivados.

Discusión VIII.2.2.1 (cont.)

(I) Parámetros:  $SO_4^{=}$  lcp y Vv, véase Tabla 30.

- 1ª.- Sea cual fuere el cemento portland de los doce, 6 P y 6 PY, seleccionados y así ensayados, la evolución de los valores de los parámetros  $SO_4^{=}$  lcp y Vv de sus probetas respectivas, varía notablemente en el transcurso del ensayo según tengan, ó no,  $C_3A$  el cemento portland ensayado, de modo y manera que:

- a) si el mismo es de elevado o mediano alto contenido de  $C_3A$ , caso del P-1, P-2, P-4, P-32 y P-31, disminuye con el transcurso del ensayo,
- b) si el mismo es de mediano ó bajo contenido de  $C_3A$ , caso del P-5, PY-5, PY-1 y PY-2,
- en las primeras edades se produce un aumento hasta llegar a un valor máximo alcanzado a edad variable (21, 28, 150 y 120 días respectivamente),
  - en las edades siguientes respectivas se produce una disminución, seguida ó no, de aumento inmediato o tardío según los casos, es decir la variación es sinuoidal.
- c) si el mismo es de escaso contenido de  $C_3A$ , caso del PY-3, se produce una disminución hasta llegar a un valor mínimo (a 28 días) a partir del cual se origina un aumento gradativo hasta la edad final del ensayo; en definitiva la variación es también sinuoidal de periodo cambiado,
- d) si el mismo es de nulo contenido de  $C_3A$ , caso del PY-4 y el PY-6, se produce un aumento gradativo hasta la edad final del ensayo.

Tabla 90

Edad (días)	P-1					P-11					PY-5				
	AL (%)	Valor de 8 seg	Med.	AL ± E	V	AL (%)	Valor de 8 seg	Med.	AL ± E	V	AL (%)	Valor de 8 seg	Med.	AL ± E	V
7	0,094	0,094	0,093	0,09450,002	1,0	0,130	0,132	0,148	0,09100,002	3,5	0,106	0,095	0,094	0,09420,002	1,0
14	0,116	0,116	0,114	0,11600,002	1,0	0,071	0,102	0,070	0,07100,001	1,4	0,008	0,009	0,007	0,00800,001	0,0
21	0,217	0,219	0,215	0,21750,002	0,6	0,094	0,095	0,093	0,09420,001	1,0	0,009	0,010	0,008	0,00900,001	10,0
28	0,476	0,476	0,473	0,47450,002	0,4	0,125	0,107	0,103	0,10500,002	1,4	0,009	0,010	0,008	0,00900,001	9,9
60	0,954	0,956	0,952	0,95400,002	0,1	0,169	0,159	0,168	0,16800,001	0,7	0,010	0,010	0,009	0,01000,001	5,0
90	0,959	0,962	0,958	0,95950,002	0,2	0,229	0,229	0,227	0,22800,001	0,4	0,010	0,010	0,009	0,01000,001	9,0
120	0,961	0,963	0,960	0,96150,002	0,1	0,240	0,239	0,242	0,24000,002	0,4	0,011	0,013	0,010	0,01100,001	112,0
150	0,962	0,964	0,961	0,96250,002	0,1	0,242	0,242	0,240	0,24150,001	0,4	0,012	0,015	0,011	0,01200,001	14,0
180	0,962	0,965	0,960	0,96250,002	0,2	0,242	0,243	0,241	0,24200,001	0,4	0,014	0,016	0,012	0,01400,001	12,8
210	0,963	0,965	0,961	0,96300,002	0,2	0,245	0,247	0,243	0,24500,002	0,8	0,016	0,018	0,014	0,01600,001	10,4
240	0,965	0,967	0,963	0,96500,002	0,2	0,245	0,251	0,247	0,24900,002	0,8	0,023	0,025	0,021	0,02300,002	6,5
265	0,966	0,968	0,964	0,96600,002	0,2	0,253	0,255	0,251	0,25300,002	0,4	0,027	0,028	0,025	0,02700,001	4,4
292	0,976	0,977	0,973	0,97450,003	0,2	0,267	0,265	0,263	0,26500,002	0,4	0,040	0,042	0,038	0,04000,001	3,7

TABLE 26

Espec.	CIMENTOS P						CIMENTOS PY					
	Al P-1	Al Vol	Al Vcl	Al P-2	Al Vol	Al Vcl	Al P-3	Al Vol	Al Vcl	Al P-4	Al Vol	Al Vcl
BD-20 (ele)	-70% ASTRUESSO						-70% ASTRUESSO					
1	7	134	134	7	134	134	7	134	134	7	134	134
14	134	134	134	14	134	134	14	134	134	14	134	134
21	277	194	194	21	277	194	21	277	194	21	277	194
28	134	134	134	28 <td>134</td> <td>134</td> <td>28<td>134</td><td>134</td><td>28<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	28 <td>134</td> <td>134</td> <td>28<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	28 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
35	134	134	134	35 <td>134</td> <td>134</td> <td>35<td>134</td><td>134</td><td>35<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	35 <td>134</td> <td>134</td> <td>35<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	35 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
42	134	134	134	42 <td>134</td> <td>134</td> <td>42<td>134</td><td>134</td><td>42<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	42 <td>134</td> <td>134</td> <td>42<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	42 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
49	134	134	134	49 <td>134</td> <td>134</td> <td>49<td>134</td><td>134</td><td>49<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	49 <td>134</td> <td>134</td> <td>49<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	49 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
56	134	134	134	56 <td>134</td> <td>134</td> <td>56<td>134</td><td>134</td><td>56<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	56 <td>134</td> <td>134</td> <td>56<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	56 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
63	134	134	134	63 <td>134</td> <td>134</td> <td>63<td>134</td><td>134</td><td>63<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	63 <td>134</td> <td>134</td> <td>63<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	63 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
70	134	134	134	70 <td>134</td> <td>134</td> <td>70<td>134</td><td>134</td><td>70<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	70 <td>134</td> <td>134</td> <td>70<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	70 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
77	134	134	134	77 <td>134</td> <td>134</td> <td>77<td>134</td><td>134</td><td>77<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	77 <td>134</td> <td>134</td> <td>77<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	77 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
84	134	134	134	84 <td>134</td> <td>134</td> <td>84<td>134</td><td>134</td><td>84<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	84 <td>134</td> <td>134</td> <td>84<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	84 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
91	134	134	134	91 <td>134</td> <td>134</td> <td>91<td>134</td><td>134</td><td>91<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	91 <td>134</td> <td>134</td> <td>91<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	91 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
98	134	134	134	98 <td>134</td> <td>134</td> <td>98<td>134</td><td>134</td><td>98<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	98 <td>134</td> <td>134</td> <td>98<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	98 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
105	134	134	134	105 <td>134</td> <td>134</td> <td>105<td>134</td><td>134</td><td>105<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	105 <td>134</td> <td>134</td> <td>105<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	105 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
112	134	134	134	112 <td>134</td> <td>134</td> <td>112<td>134</td><td>134</td><td>112<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	112 <td>134</td> <td>134</td> <td>112<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	112 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
119	134	134	134	119 <td>134</td> <td>134</td> <td>119<td>134</td><td>134</td><td>119<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	119 <td>134</td> <td>134</td> <td>119<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	119 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
126	134	134	134	126 <td>134</td> <td>134</td> <td>126<td>134</td><td>134</td><td>126<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	126 <td>134</td> <td>134</td> <td>126<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	126 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
133	134	134	134	133 <td>134</td> <td>134</td> <td>133<td>134</td><td>134</td><td>133<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	133 <td>134</td> <td>134</td> <td>133<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	133 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
140	134	134	134	140 <td>134</td> <td>134</td> <td>140<td>134</td><td>134</td><td>140<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	140 <td>134</td> <td>134</td> <td>140<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	140 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
147	134	134	134	147 <td>134</td> <td>134</td> <td>147<td>134</td><td>134</td><td>147<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	147 <td>134</td> <td>134</td> <td>147<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	147 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
154	134	134	134	154 <td>134</td> <td>134</td> <td>154<td>134</td><td>134</td><td>154<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	154 <td>134</td> <td>134</td> <td>154<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	154 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
161	134	134	134	161 <td>134</td> <td>134</td> <td>161<td>134</td><td>134</td><td>161<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	161 <td>134</td> <td>134</td> <td>161<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	161 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
168	134	134	134	168 <td>134</td> <td>134</td> <td>168<td>134</td><td>134</td><td>168<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	168 <td>134</td> <td>134</td> <td>168<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	168 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
175	134	134	134	175 <td>134</td> <td>134</td> <td>175<td>134</td><td>134</td><td>175<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	175 <td>134</td> <td>134</td> <td>175<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	175 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
182	134	134	134	182 <td>134</td> <td>134</td> <td>182<td>134</td><td>134</td><td>182<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	182 <td>134</td> <td>134</td> <td>182<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	182 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
189	134	134	134	189 <td>134</td> <td>134</td> <td>189<td>134</td><td>134</td><td>189<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	189 <td>134</td> <td>134</td> <td>189<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	189 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
196	134	134	134	196 <td>134</td> <td>134</td> <td>196<td>134</td><td>134</td><td>196<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	196 <td>134</td> <td>134</td> <td>196<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	196 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
203	134	134	134	203 <td>134</td> <td>134</td> <td>203<td>134</td><td>134</td><td>203<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	203 <td>134</td> <td>134</td> <td>203<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	203 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
210	134	134	134	210 <td>134</td> <td>134</td> <td>210<td>134</td><td>134</td><td>210<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	210 <td>134</td> <td>134</td> <td>210<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	210 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
217	134	134	134	217 <td>134</td> <td>134</td> <td>217<td>134</td><td>134</td><td>217<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	217 <td>134</td> <td>134</td> <td>217<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	217 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
224	134	134	134	224 <td>134</td> <td>134</td> <td>224<td>134</td><td>134</td><td>224<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	224 <td>134</td> <td>134</td> <td>224<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	224 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
231	134	134	134	231 <td>134</td> <td>134</td> <td>231<td>134</td><td>134</td><td>231<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	231 <td>134</td> <td>134</td> <td>231<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	231 <td>134</td> <td>134</td>	134	134
238	134	134	134	238 <td>134</td> <td>134</td> <td>238<td>134</td><td>134</td><td>238<td>134</td><td>134</td></td></td>	134	134	238 <td>134</td> <td>134</td> <td>238<td>134</td><td>134</td></td>	134	134	238 <td>134</td> <td>134</td>	134	134

a) Tipo de prueba: *Impacto*<sup>12a</sup>, ASTM C 452-68 e NH

**TABLA 73**

[illegible]

TABLA 28

Cemento	CEMENTOS P						ASTHOSOL	CEMENTOS PY					
	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6		PY-1	PY-2	PY-3	PY-4	PY-5	PY-6
1	47.50	48.00	48.50	49.00	49.50	50.00		47.50	48.00	48.50	49.00	49.50	50.00
7	48.50	49.00	49.50	50.00	50.50	51.00		48.50	49.00	49.50	50.00	50.50	51.00
14	49.50	50.00	50.50	51.00	51.50	52.00		49.50	50.00	50.50	51.00	51.50	52.00
21	50.50	51.00	51.50	52.00	52.50	53.00		50.50	51.00	51.50	52.00	52.50	53.00
28	51.50	52.00	52.50	53.00	53.50	54.00		51.50	52.00	52.50	53.00	53.50	54.00
35	52.50	53.00	53.50	54.00	54.50	55.00		52.50	53.00	53.50	54.00	54.50	55.00
42	53.50	54.00	54.50	55.00	55.50	56.00		53.50	54.00	54.50	55.00	55.50	56.00
49	54.50	55.00	55.50	56.00	56.50	57.00		54.50	55.00	55.50	56.00	56.50	57.00
56	55.50	56.00	56.50	57.00	57.50	58.00		55.50	56.00	56.50	57.00	57.50	58.00
63	56.50	57.00	57.50	58.00	58.50	59.00		56.50	57.00	57.50	58.00	58.50	59.00
70	57.50	58.00	58.50	59.00	59.50	60.00		57.50	58.00	58.50	59.00	59.50	60.00
77	58.50	59.00	59.50	60.00	60.50	61.00		58.50	59.00	59.50	60.00	60.50	61.00
84	59.50	60.00	60.50	61.00	61.50	62.00		59.50	60.00	60.50	61.00	61.50	62.00
91	60.50	61.00	61.50	62.00	62.50	63.00		60.50	61.00	61.50	62.00	62.50	63.00
98	61.50	62.00	62.50	63.00	63.50	64.00		61.50	62.00	62.50	63.00	63.50	64.00
105	62.50	63.00	63.50	64.00	64.50	65.00		62.50	63.00	63.50	64.00	64.50	65.00
112	63.50	64.00	64.50	65.00	65.50	66.00		63.50	64.00	64.50	65.00	65.50	66.00
119	64.50	65.00	65.50	66.00	66.50	67.00		64.50	65.00	65.50	66.00	66.50	67.00
126	65.50	66.00	66.50	67.00	67.50	68.00		65.50	66.00	66.50	67.00	67.50	68.00
133	66.50	67.00	67.50	68.00	68.50	69.00		66.50	67.00	67.50	68.00	68.50	69.00
140	67.50	68.00	68.50	69.00	69.50	70.00		67.50	68.00	68.50	69.00	69.50	70.00
147	68.50	69.00	69.50	70.00	70.50	71.00		68.50	69.00	69.50	70.00	70.50	71.00
154	69.50	70.00	70.50	71.00	71.50	72.00		69.50	70.00	70.50	71.00	71.50	72.00
161	70.50	71.00	71.50	72.00	72.50	73.00		70.50	71.00	71.50	72.00	72.50	73.00
168	71.50	72.00	72.50	73.00	73.50	74.00		71.50	72.00	72.50	73.00	73.50	74.00
175	72.50	73.00	73.50	74.00	74.50	75.00		72.50	73.00	73.50	74.00	74.50	75.00
182	73.50	74.00	74.50	75.00	75.50	76.00		73.50	74.00	74.50	75.00	75.50	76.00
189	74.50	75.00	75.50	76.00	76.50	77.00		74.50	75.00	75.50	76.00	76.50	77.00
196	75.50	76.00	76.50	77.00	77.50	78.00		75.50	76.00	76.50	77.00	77.50	78.00
203	76.50	77.00	77.50	78.00	78.50	79.00		76.50	77.00	77.50	78.00	78.50	79.00
210	77.50	78.00	78.50	79.00	79.50	80.00		77.50	78.00	78.50	79.00	79.50	80.00
217	78.50	79.00	79.50	80.00	80.50	81.00		78.50	79.00	79.50	80.00	80.50	81.00
224	79.50	80.00	80.50	81.00	81.50	82.00		79.50	80.00	80.50	81.00	81.50	82.00
231	80.50	81.00	81.50	82.00	82.50	83.00		80.50	81.00	81.50	82.00	82.50	83.00
238	81.50	82.00	82.50	83.00	83.50	84.00		81.50	82.00	82.50	83.00	83.50	84.00
245	82.50	83.00	83.50	84.00	84.50	85.00		82.50	83.00	83.50	84.00	84.50	85.00
252	83.50	84.00	84.50	85.00	85.50	86.00		83.50	84.00	84.50	85.00	85.50	86.00
259	84.50	85.00	85.50	86.00	86.50	87.00		84.50	85.00	85.50	86.00	86.50	87.00
266	85.50	86.00	86.50	87.00	87.50	88.00		85.50	86.00	86.50	87.00	87.50	88.00
273	86.50	87.00	87.50	88.00	88.50	89.00		86.50	87.00	87.50	88.00	88.50	89.00
280	87.50	88.00	88.50	89.00	89.50	90.00		87.50	88.00	88.50	89.00	89.50	90.00
287	88.50	89.00	89.50	90.00	90.50	91.00		88.50	89.00	89.50	90.00	90.50	91.00
294	89.50	90.00	90.50	91.00	91.50	92.00		89.50	90.00	90.50	91.00	91.50	92.00
301	90.50	91.00	91.50	92.00	92.50	93.00		90.50	91.00	91.50	92.00	92.50	93.00
308	91.50	92.00	92.50	93.00	93.50	94.00		91.50	92.00	92.50	93.00	93.50	94.00
315	92.50	93.00	93.50	94.00	94.50	95.00		92.50	93.00	93.50	94.00	94.50	95.00
322	93.50	94.00	94.50	95.00	95.50	96.00		93.50	94.00	94.50	95.00	95.50	96.00
329	94.50	95.00	95.50	96.00	96.50	97.00		94.50	95.00	95.50	96.00	96.50	97.00
336	95.50	96.00	96.50	97.00	97.50	98.00		95.50	96.00	96.50	97.00	97.50	98.00
343	96.50	97.00	97.50	98.00	98.50	99.00		96.50	97.00	97.50	98.00	98.50	99.00
350	97.50	98.00	98.50	99.00	99.50	100.00		97.50	98.00	98.50	99.00	99.50	100.00
357	98.50	99.00	99.50	100.00	100.50	101.00		98.50	99.00	99.50	100.00	100.50	101.00
364	99.50	100.00	100.50	101.00	101.50	102.00		99.50	100.00	100.50	101.00	101.50	102.00
371	100.50	101.00	101.50	102.00	102.50	103.00		100.50	101.00	101.50	102.00	102.50	103.00
378	101.50	102.00	102.50	103.00	103.50	104.00		101.50	102.00	102.50	103.00	103.50	104.00
385	102.50	103.00	103.50	104.00	104.50	105.00		102.50	103.00	103.50	104.00	104.50	105.00
392	103.50	104.00	104.50	105.00	105.50	106.00		103.50	104.00	104.50	105.00	105.50	106.00
399	104.50	105.00	105.50	106.00	106.50	107.00		104.50	105.00	105.50	106.00	106.50	107.00
406	105.50	106.00	106.50	107.00	107.50	108.00		105.50	106.00	106.50	107.00	107.50	108.00
413	106.50	107.00	107.50	108.00	108.50	109.00		106.50	107.00	107.50	108.00	108.50	109.00
420	107.50	108.00	108.50	109.00	109.50	110.00		107.50	108.00	108.50	109.00	109.50	110.00
427	108.50	109.00	109.50	110.00	110.50	111.00		108.50	109.00	109.50	110.00	110.50	111.00
434	109.50	110.00	110.50	111.00	111.50	112.00		109.50	110.00	110.50	111.00	111.50	112.00
441	110.50	111.00	111.50	112.00	112.50	113.00		110.50	111.00	111.50	112.00	112.50	113.00
448	111.50	112.00	112.50	113.00	113.50	114.00		111.50	112.00	112.50	113.00	113.50	114.00
455	112.50	113.00	113.50	114.00	114.50	115.00		112.50	113.00	113.50	114.00	114.50	115.00
462	113.50	114.00	114.50	115.00	115.50	116.00		113.50	114.00	114.50	115.00	115.50	116.00
469	114.50	115.00	115.50	116.00	116.50	117.00		114.50	115.00	115.50	116.00	116.50	117.00
476	115.50	116.00	116.50	117.00	117.50	118.00		115.50	116.00	116.50	117.00	117.50	118.00
483	116.50	117.00	117.50	118.00	118.50	119.00		116.50	117.00	117.50	118.00	118.50	119.00
490	117.50	118.00	118.50	119.00	119.50	120.00		117.50	118.00	118.50	119.00	119.50	120.00
497	118.50	119.00	119.50	120.00	120.50	121.00		118.50	119.00	119.50	120.00	120.50	121.00
504	119.50	120.00	120.50	121.00	121.50	122.00		119.50	120.00	120.50	121.00	121.50	122.00
511	120.50	121.00	121.50	122.00	122.50	123.00		120.50	121.00	121.50	122.00	122.50	123.00
518	121.50	122.00	122.50	123.00	123.50	124.00		121.50	122.00	122.50	123.00	123.50	124.00
525	122.50	123.00	123.50	124.00	124.50	125.00		122.50	123.00	123.50	124.00	124.50	125.00
532	123.50	124.00	124.50	125.00	125.50	126.00		123.50	124.00	124.50	125.00	125.50	126.00
539	124.50	125.00	125.50	126.00	126.50	127.00		124.50	125.00	125.50	126.00	126.50	127.00
546	125.50	126.00	126.50	127.00	127.50	128.00		125.50	126.00	126.50	127.00	127.50	128.00
553	126.50	127.00	127.50	128.00	128.50	129.00		126.50	127.00	127.50	128.00	128.50	129.00
560	127.50	128.00	128.50	129.00	129.50	130.00		127.50	128.00	128.50	129.00	129.50	130.00
567	128.50	129.00	129.50	130.00	130.50	131.00		128.50	129.00	129.50	130.00	130.50	131.00
574	129.50	130.00	130.50	131.00	131.50	132.00		129.50	130.00	130.50	131.00	131.50	132.00
581	130.50	131.00	131.50	132.00	132.50	133.00		130.50	131.00	131.50	132.00	132.50	133.00
588	131.50	132.00											

TABLE 29

[illegible]

TAB. A 30

EBOA (mm)	CEMENTOS P										CEMENTOS PY										
	P-1	P-2	P-3	P-32	P-31	P-5	ASTHEDON				PY-5	PY-1	PY-2	PY-3	PY-6	PY-8					
7	471,8	0,8	500,8	71,8	888,8	103,8	483,8	0,8	508,8	0,0	885,8	127,8	581,8	182,8	156,2	802,8	605,8	118,8	771,8	138,8	471,8
14	465,8	-0,8	491,8	45,8	882,8	-0,8	441,8	-11,2	533,8	-1,8	877,8	8,8	580,8	188,8	0,8	555,8	12,8	775,8	1,2	772,8	1,2
21	459,8	-1,8	484,8	39,8	876,8	-1,8	435,8	-21,2	541,8	-2,8	871,8	2,8	574,8	194,8	-1,8	549,8	16,8	781,8	-2,2	776,8	5,2
28	453,8	-2,8	478,8	33,8	870,8	-2,8	429,8	-31,2	549,8	-3,8	865,8	7,8	568,8	200,8	-2,8	543,8	22,8	787,8	-3,2	782,8	10,2
35	447,8	-3,8	472,8	27,8	864,8	-3,8	423,8	-41,2	557,8	-4,8	859,8	12,8	562,8	206,8	-3,8	537,8	28,8	793,8	-4,2	788,8	16,2
42	441,8	-4,8	466,8	21,8	858,8	-4,8	417,8	-51,2	565,8	-5,8	853,8	17,8	556,8	212,8	-4,8	531,8	34,8	799,8	-5,2	794,8	22,2
49	435,8	-5,8	460,8	15,8	852,8	-5,8	411,8	-61,2	573,8	-6,8	847,8	22,8	550,8	218,8	-5,8	525,8	40,8	805,8	-6,2	800,8	28,2
56	429,8	-6,8	454,8	9,8	846,8	-6,8	405,8	-71,2	581,8	-7,8	841,8	27,8	544,8	224,8	-6,8	519,8	46,8	811,8	-7,2	806,8	34,2
63	423,8	-7,8	448,8	3,8	840,8	-7,8	399,8	-81,2	589,8	-8,8	835,8	32,8	538,8	230,8	-7,8	513,8	52,8	817,8	-8,2	812,8	40,2
70	417,8	-8,8	442,8	-3,8	834,8	-8,8	393,8	-91,2	597,8	-9,8	829,8	37,8	532,8	236,8	-8,8	507,8	58,8	823,8	-9,2	818,8	46,2
77	411,8	-9,8	436,8	-9,8	828,8	-9,8	387,8	-101,2	605,8	-10,8	823,8	42,8	526,8	242,8	-9,8	501,8	64,8	829,8	-10,2	824,8	52,2
84	405,8	-10,8	430,8	-15,8	822,8	-10,8	381,8	-111,2	613,8	-11,8	817,8	47,8	520,8	248,8	-10,8	495,8	70,8	835,8	-11,2	830,8	58,2
91	399,8	-11,8	424,8	-21,8	816,8	-11,8	375,8	-121,2	621,8	-12,8	811,8	52,8	514,8	254,8	-11,8	489,8	76,8	841,8	-12,2	836,8	64,2
98	393,8	-12,8	418,8	-27,8	810,8	-12,8	369,8	-131,2	629,8	-13,8	805,8	57,8	508,8	260,8	-12,8	483,8	82,8	847,8	-13,2	842,8	70,2
105	387,8	-13,8	412,8	-33,8	804,8	-13,8	363,8	-141,2	637,8	-14,8	799,8	62,8	502,8	266,8	-13,8	477,8	88,8	853,8	-14,2	848,8	76,2
112	381,8	-14,8	406,8	-39,8	798,8	-14,8	357,8	-151,2	645,8	-15,8	793,8	67,8	496,8	272,8	-14,8	471,8	94,8	859,8	-15,2	854,8	82,2
119	375,8	-15,8	400,8	-45,8	792,8	-15,8	351,8	-161,2	653,8	-16,8	787,8	72,8	490,8	278,8	-15,8	465,8	100,8	865,8	-16,2	860,8	88,2
126	369,8	-16,8	394,8	-51,8	786,8	-16,8	345,8	-171,2													

EBOA (mm)	CEMENTOS P										CEMENTOS PY										
	P-1	P-2	P-3	P-32	P-31	P-5	ASTHEDON				PY-5	PY-1	PY-2	PY-3	PY-6	PY-8					
7	471,8	0,8	500,8	71,8	888,8	103,8	483,8	0,8	508,8	0,0	885,8	127,8	581,8	182,8	156,2	802,8	605,8	118,8	771,8	138,8	471,8
14	465,8	-0,8	491,8	45,8	882,8	-0,8	441,8	-11,2	533,8	-1,8	877,8	8,8	580,8	188,8	0,8	555,8	12,8	775,8	1,2	772,8	1,2
21	459,8	-1,8	484,8	39,8	876,8	-1,8	435,8	-21,2	541,8	-2,8	871,8	2,8	574,8	194,8	-1,8	549,8	16,8	781,8	-2,2	776,8	5,2
28	453,8	-2,8	478,8	33,8	870,8	-2,8	429,8	-31,2	549,8	-3,8	865,8	7,8	568,8	200,8	-2,8	543,8	22,8	787,8	-3,2	782,8	10,2
35	447,8	-3,8	472,8	27,8	864,8	-3,8	423,8	-41,2	557,8	-4,8	859,8	12,8	562,8	206,8	-3,8	537,8	28,8	793,8	-4,2	788,8	16,2
42	441,8	-4,8	466,8	21,8	858,8	-4,8	417,8	-51,2	565,8	-5,8	853,8	17,8	556,8	212,8	-4,8	531,8	34,8	799,8	-5,2	794,8	22,2
49	435,8	-5,8	460,8	15,8	852,8	-5,8	411,8	-61,2	573,8	-6,8	847,8	22,8	550,8	218,8	-5,8	525,8	40,8	805,8	-6,2	800,8	28,2
56	429,8	-6,8	454,8	9,8	846,8	-6,8	405,8	-71,2	581,8	-7,8	841,8	27,8	544,8	224,8	-6,8	519,8	46,8	811,8	-7,2	806,8	34,2
63	423,8	-7,8	448,8	3,8	840,8	-7,8	399,8	-81,2	589,8	-8,8	835,8	32,8	538,8	230,8	-7,8	513,8	52,8	817,8	-8,2	812,8	40,2
70	417,8	-8,8	442,8	-3,8	834,8	-8,8	393,8	-91,2	597,8	-9,8	829,8	37,8	532,8	236,8	-8,8	507,8	58,8	823,8	-9,2	818,8	46,2
77	411,8	-9,8	436,8	-9,8	828,8	-9,8	387,8	-101,2	605,8	-10,8	823,8	42,8	526,8	242,8	-9,8	501,8	64,8	829,8	-10,2	824,8	52,2
84	405,8	-10,8	430,8	-15,8	822,8	-10,8	381,8	-111,2	613,8	-11,8	817,8	47,8	520,8	248,8	-10,8	495,8	70,8	835,8	-11,2	830,8	58,2
91	399,8	-11,8	424,8	-21,8	816,8	-11,8	375,8	-121,2	621,8	-12,8	811,8	52,8	514,8	254,8	-11,8	489,8	76,8	841,8	-12,2	836,8	64,2
98	393,8	-12,8	418,8	-27,8	810,8	-12,8	369,8	-131,2	629,8	-13,8	805,8	57,8	508,8	260,8	-12,8	483,8	82,8	847,8	-13,2	842,8	70,2
105	387,8	-13,8	412,8	-33,8	804,8	-13,8	363,8	-141,2	637,8	-14,8	799,8	62,8	502,8	266,8	-13,8	477,8	88,8	853,8	-14,2	848,8	76,2
112	381,8	-14,8	406,8	-39,8	798,8	-14,8	357,8	-151,2	645,8	-15,8	793,8	67,8	496,8	272,8	-14,8	471,8	94,8	859,8	-15,2	854,8	82,2
119	375,8	-15,8	400,8	-45,8	792,8	-15,8	351,8	-161,2	653,8	-16,8	787,8	72,8	490,8	278,8	-15,8	465,8	100,8	865,8	-16,2	860,8	88,2
126	369,8	-16,8	394,8	-51,8	786,8	-16,8	345,8	-171,2													

EBOA (mm)	CEMENTOS P										CEMENTOS PY										
	P-1	P-2	P-3	P-32	P-31	P-5	ASTHEDON				PY-5	PY-1	PY-2	PY-3	PY-6	PY-8					
7	471,8	0,8	500,8	71,8	888,8	103,8	483,8	0,8	508,8	0,0	885,8	127,8	581,8	182,8	156,2	802,8	605,8	118,8	771,8	138,8	471,8
14	465,8	-0,8	491,8	45,8	882,8	-0,8	441,8	-11,2	533,8	-1,8	877,8	8,8	580,8	188,8	0,8	555,8	12,8	775,8	1,2	772,8	1,2
21	459,8	-1,8	484,8	39,8	876,8	-1,8	435,8	-21,2	541,8	-2,8	871,8	2,8	574,8	194,8	-1,8	549,8	16,8	781,8	-2,2	776,8	5,2
28	453,8	-2,8	478,8	33,8	870,8	-2,8	429,8	-31,2	549,8	-3,8	865,8	7,8	568,8	200,8	-2,8	543,8	22,8	787,8	-3,2	782,8	10,2
35	447,8	-3,8	472,8	27,8	864,8	-3,8	423,8	-41,2	557,8	-4,8	859,8	12,8	562,8	206,8	-3,8	537,8	28,8	793,8	-4,2	788,8	16,2
42	441,8	-4,8	466,8	21,8	858,8	-4,8	417,8	-51,2	565,8	-5,8	853,8	17,8	556,8	212,8	-4,8	531,8	34,8	799,8	-5,2	794,8	22,2
49	435,8	-5,8	460,8	15,8	852,8	-5,8	411,8	-61,2	573,8	-6,8	847,8	22,8	550,8	218,8	-5,8	525,8	40,8	805,8	-6,2	800,8	28,2
56	429,8	-6,8	454,8	9,8	846,8	-6,8	405,8	-71,2	581,8	-7,8	841,8	27,8	544,8	224,8	-6,8	519,8	46,8	811,8	-7,2	806,8	34,2
63	423,8	-7,8	448,8	3,8	840,8	-7,8	399,8	-81,2	589,8	-8,8	835,8	32,8	538,8	230,8	-7,8	513,8	52,8	817,8	-8,2	812,8	40,2
70	417,8	-8,8	442,8	-3,8	834,8	-8,8	393,8	-91,2	597,8	-9,8	829,8	37,8	532,8	236,8	-8,8	507,8	58,8	823,8	-9,2	818,8	46,2
77	411,8	-9,8	436,8	-9,8	828,8	-9,8	387,8	-101,2	605,8	-10,8	823,8	42,8	526,8	242,8	-9,8	501,8	64,8	829,8	-10,2	824,8	52,2
84	405,8	-10,8	430,8	-15,8	822,8	-10,8	381,8	-111,2	613,8	-11,8	817,8	47,8	520,8	248,8	-10,8	495,8	70,8	835,8	-11,2	830,8	58,2
91	399,8	-11,8	424,8	-21,8	816,8	-11,8	375,8	-121,2	621,8	-12,8	811,8	52,8	514,8	254,8	-11,8	489,8	76,8	841,8	-12,2	836,8	64,2
98	393,8	-12,8	418,8	-27,8	810,8	-12,8	369,8	-131,2	629,8	-13,8	805,8	57,8	508,8	260,8	-12,8	483,8	82,8	847,8	-13,2	842,8	70,2
105	387,8	-13,8	412,8	-33,8	804,8	-13,8	363,8	-141,2	637,8	-14,8	799,8	62,8	502,8	266,8	-13,8	477,8	88,8	853,8	-14,2	848,8	76,2
112	381,8	-14,8	406,8	-39,8	798,8	-14,8	357,8	-151,2	645,8	-15,8	793,8	67,8	496,8	272,8	-14,8	471,8	94,8	859,8	-15,2	854,8	82,2
119	375,8	-15,8	400,8	-45,8	792,8	-15,8	351,8	-161,2	653,8	-16,8	787,8	72,8	490,8	278,8	-15,8	465,8	100,8	865,8	-16,2	860,8	88,2
126	369,8	-16,8	394,8	-51,8	786,8	-16,8	345,8	-171,2													

EBOA (mm)	CEMENTOS P										CEMENTOS PY										
	P-1	P-2	P-3	P-32	P-31	P-5	ASTHEDON				PY-5	PY-1	PY-2	PY-3	PY-6	PY-8					
7	471,8	0,8	500,8	71,8	888,8	103,8	483,8	0,8	508,8	0,0	885,8	127,8	581,8	182,8	156,2	802,8	605,8	118,8	771,8	138,8	471,8
14	465,8	-0,8	491,8	45,8	882,8	-0,8	441,8	-11,2	533,8	-1,8	877,8	8,8	580,8	188,8	0,8	555,8	12,8	775,8	1,2	772,8	1,2
21	459,8	-1,8	484,8	39,8	876,8	-1,8	435,8	-21,2	541,8	-2,8	871,8</										

- 2<sup>a</sup>. - Por lo general y a grandes rasgos, la  $SO_4^{=}$  lcp de las probetas, aumenta con la disminución en el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland constitutivo. Esta generalidad se cumple con mayor aproximación en los cementos portland ensayados de bajo, escaso y prácticamente nulo contenido de  $C_3A$ , que en los de mediano a elevado contenido de  $C_3A$ , entre los cuales se ha de destacar la existencia de discrepancias muy notables entre los mismos.
- 3<sup>a</sup>. - Sea cual fuere el cemento portland ensayado, el mayor consumo ó fijación, en su caso, de  $SO_4^{=}$  agresivo, se debe de verificar durante los primeros 28 días de edad de sus probetas respectivas.

Interpretación VIII.2.2.1 (E)(F) (pero siguiendo el orden cronológico de las Discusiones de la (E)).

Antes de entrar en esta interpretación, se ha de hacer constar que tanto en la misma como en todas las restantes venideras, se tratarán de globalizar los valores de los distintos parámetros manejados en cada caso. No obstante y cuando proceda, dicha interpretación se circunscribirá única y exclusivamente a un(os) parámetro(s) determinado(s) que se indicará(n) oportunamente.  
De la Discusión 1<sup>a</sup>: Ello probablemente sea debido,

- a) ó bien a que la expansión-colmatación gradativa de la ett-lf que viene formándose desde el origen impide cada vez mas la difusión del agua de hidratación selenitosa a través de los poros de las probetas y con ello la posterior formación de la ett-lf 2<sup>ria</sup> en cada caso, lo cual es bastante improbable puesto que ocurre todo lo contrario hasta las citadas edades de 28, 60 y 90 días, ya que la porosidad aumenta hasta entonces, ver Tabla 28, y la Vu disminuye,
- b) ó bien a que para entonces ya se ha "consumido", en su caso, todo el 7,0% de  $SO_3$  púestos inicialmente como agresivo común, pues 7,0% de  $SO_3$  necesitarían por estequiometría 7,87%  $C_3A$  para pasar a ett-lf, y no ha lugar, por tanto, mayor formación de ett-lf expansora y por consiguiente  $\Delta L$  igualmente tan notables como al principio ó Vcl mínimas o nulas para entonces, lo cual es bastante mas probable, ya que asi mismo ocurre con la disminución en este caso de los valores correspondientes de  $SO_4^{=}$  lcp respectivos, ver Tabla 30; y todo ello
- a) bien por la interpretación que seda en la discusión siguiente y sus consecuencias pertinentes al caso, ó

Edad (días)	Método de Ensayo y Parámetro	Clasificación de los cementos portland, de acuerdo con el método ASTM C-402 y C-403, en función de los valores de los parámetros $C_3A$ y contenido de $SO_4$ expresados, de mayor a menor valor, por esta orden:
14	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
28	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
90	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
365	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
730	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
14	$C_3A$ (%)	14,25 > P-1 > P-2 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
28	$C_3A$ (%)	26,40 > P-1 > P-2 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
90	$C_3A$ (%)	40,00 > P-1 > P-2 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
365	$C_3A$ (%)	40,00 > P-1 > P-2 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
730	$C_3A$ (%)	40,00 > P-1 > P-2 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
14	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
28	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
90	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
365	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
730	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
14	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
28	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
90	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
365	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6
730	$C_3A$ (%)	P-1 > P-2 > P-4 > P-32 > P-31 > P-5 > PY-5 > PY-1 > PY-2 > PY-3 > PY-4 > PY-6

b) bien porque, en el caso de aquellos otros cementos portland de contenido escaso ó nulo de  $C_3A$ , PY-2, PY-3, PY-4 y PY-6, la  $Vcl$  originada en sus probetas respectivas a lo largo de casi todo el ensayo del mismo,

- no son mayoritaria y obviamente, hasta dichas edades, de 60 ó 90 días, de origen  $C_3A$ , dada su escasez común, y consiguientemente de origen ett-1f, y
- si son del mismo orden de magnitud que los originados a partir de dichas edades en adelante, en los cementos P ó PY, de contenido elevado, mediano y bajo de  $C_3A$ , como son el resto de los cementos ensayados.

Todo lo cual significa pues que ya en ningún caso se deben de producir cantidades notables de ett-1f,

- en el primero, caso del PY-2, PY-3, PY-4 y PY-6, por escasearles notablemente el contenido de  $C_3A$ , pese a existir cantidad de  $SO_4$  suficiente para ello, ver Tabla 3Q, donde los valores correspondientes de  $SO_4^{2-}$  lcp así nos lo confirman,
- en el segundo, caso del P-1, P-2, P-4, y P-32, porque a partir de dichas edades, debe escasearles el agresivo, (pese a tener aún los mismos, cantidad de  $C_3A$  suficiente para ello), como así lo confirman los valores correspondientes de  $SO_4^{2-}$  lcp, ver Tabla 3Q, y
- en el tercero, caso del P-31, P-5, PY-5 y PY-1, porque a partir de dichas edades, no debe de haber  $C_3A$  como tal en las probetas de los mismos, sobrando por tanto para entonces tanto más agresivo cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland



ensayado, ver Tabla 30 donde los valores correspondientes de  $\text{SO}_4^{=}$  lcp nos lo confirman, ó

- c) bién porque según lo dicho en b), al haber ensayado tales cementos portland del mismo modo pero con 21,0% de  $\text{SO}_3$ , método H-1, tal "frenazo" en la creación de  $\bar{\Delta}L$  ó des-aceleración brusca de su Vcl correspondiente no se ha producido y sí en cambio una "aceleración" brusca de los mismos, la cual resultó ser tanto mayor, cuanto mayor ha sido el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento portland ensayado; hasta el punto de que en estos últimos se ha llegado a provocar la auto-destrucción total de sus probetas respectivas, tanto mas pronto cuanto mayor era el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  de su cemento portland constitutivo, véase Tabla 26,  $\bar{\Delta}L$  y Vcl, H-1; siendo además todo ello posible por estequiometría, pues un 14,11% de  $\text{C}_3\text{A}$  necesitaría 12,46% de  $\text{SO}_3$ , menor del 21,0% de  $\text{SO}_3$  púestos inicialmente, en este caso del método H-1, como cantidad de agresivo común en forma de yeso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ .

Además el hecho de que el valor máximo del parámetro Vcl se alcance en los primeros 90 días del ensayo, (primeros 60 días en RMF y RMC y parámetros derivados correspondientes principalmente), 7 días en el caso de los PY y algún P, induce a pensar que en esos períodos de tiempo debe de transcurrir el máximo de formación del total de la ettringita correspondiente, o lo que es lo mismo, la mayor parte de la hidratación selenitosa de las probetas, por lo que a las edades posteriores preferentemente debe de quedar,

- el  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  (según sea el caso) y/o  $\text{C}_4\text{AF}$  residuales aún anhidros, principalmente, y
- las reacciones subsidiarias o derivadas de los compuestos inicialmente formados causa y origen de los apreciables  $\bar{\Delta}L$  provocados en aquellas.

Todo ello y en especial la primera parte del párrafo anterior coincide, en el fondo, con la conclusión VII.4.2, 7ª (POP) en su parte correspondiente a los cementos portland P-1, P-31 y PY-6 con el 7,0% de  $\text{SO}_3$  allí ensayados, cuyo máximo valor de formación de ett-lf alcanzóse en todos ellos a la edad del ensayo de 21 días, es decir, entre las edades de 7 y 90 días, en este caso, como cabía esperar, no coincidiendo exactamente ambos valores máximos respectivos, porque tales sistemas, mortero y pasta, son muy distintos y si bien la mayor porosidad del mortero induce a pensar en una mas pronta consecución del máximo de ett-lf a formar en todos los casos,

ello se ve menoscabado por la posibilidad real de que el mismo facilita también mas y mejor el proceso expansión-colmatación, con sus retrasos pertinentes, de la ett-lf formada a las primeras edades del ensayo. No obstante lo verdaderamente interesante de esta parte final de la interpretación es que pese a alcanzarse en ocasiones el máximo valor de la Vcl a la edad de 60 ó 90 días (caso de los cementos P-2 y P-1, cuyo contenido de  $C_3A$ , 11,09% y 14,11%, respectivamente, es elevado)—lo cual preconiza que en tales casos la casi totalidad de la ett-lf se forma a dichas edades intermedias, es decir, 44 días después de la edad de 14 días—, se adopta esta edad del ensayo para calificar a los cementos P-1 y P-2 en cuestión; con lo cual el método a tal edad no dictamina por la ett-lf total que se forma sino sólo por la ett-lf que se ha formado a la edad de 14 días y de ahí preconiza la que aún se debe formar, bastándole aquella para emitir su diagnóstico. Luego en cierta medida este método de ensayo presupone tanto mas cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, y viceversa en caso contrario, en cuyo caso certifica, lo cual es lo lógico dado que por estequiometría,  $7,0\% \langle \rangle 7,37\% C_3A$  y  $14,11\% - 7,87\% = 6,24\% C_3A$  que no puede formar ett-lf por falta de  $SO_3$ . Por ello lo ideal sería que hubiese cantidad de  $SO_3$  suficiente para que toda la máxima cantidad de  $C_3A$  posible, en este caso la 14,11% del cemento portland P-1, forme ett-lf y consiguientemente a la hora de calificar se certifique mejor que se pre-juzgue. De aquí la creación, entre otras razones, del método HIBRIDO-1, para dicho fin.

Y en cuanto a lo ocurrido con los correspondientes valores del parámetro derivado Vcl, se tiene que el hecho de la existencia del valor mínimo citado de Vcl así como la edad de su aparición a 7 días, para el caso de los cementos P-1, P-2 y P-4, da pie a pensar que la ett-lf inicialmente formada es expansora y colmatante, lo cual se confirma:

- por la disminución de los valores de Porosidad correspondientes, ver Tabla 29, y
- por el aumento de los valores de Vu correspondientes, ver Tabla 30.

ambos a tal edad ó bien la inmediata de 14 días; y todo ello porque muy probablemente el grado de endurecimiento de las mismas sea inferior a lo normal dado el exceso de retardador de fraguado,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , añadido y para entonces presente en su mayor parte. Por tal motivo y

una vez más, colmatadas y endurecidas tales probetas, las formaciones ulteriores de ett-lf deberán ser ya más expansoras que colmatantes, hasta la disminución de la misma con meta en su nulidad de formación por "consumo" gradativo del 7,0% de  $\text{SO}_3$  púestole inicialmente como cantidad de agresivo común al  $\text{C}_3\text{A}$  de cada cemento P citado para tal fin, como lo confirman:

- a) la cantidad de  $\text{SO}_4^{=}$  lcp, el cual es como debiera, de un orden de magnitud cada vez más parecido, conforme transcurre el ensayo, ver Tabla nº 30,
- b) el aumento de Poros, hasta llegar a un valor máximo probablemente coincidente con el de la nulidad de formación de ett-lf, a partir del cual deberá disminuir hasta la edad final del ensayo por colmatación ulterior de origen distinto, y
- c) la disminución más o menos en paralelo de la Vu hasta llegar a un valor mínimo a partir del cual aumentará o variará poco de lo mismo por idéntico motivo anterior, como así ha ocurrido en este trabajo con estos dos últimos parámetros.

Finalmente el hecho del aumento de tal valor de Vcl a 7 días con el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento portland confirma la razón dada en el apartado c) de la pag. 324 sobre la causa mas probable de la "detención" ó "frenazo" -Vcl mínimo o nulo- de las probetas.

De la Discusión 2ª: La coincidencia prácticamente total de ambas clasificaciones expuestas en función del  $\bar{\Delta}\text{L}$  y  $\text{C}_3\text{A}$ , respectivamente, reside en el hecho de sobra conocido y citado en la parte de generalidades, de que a mayor cantidad de  $\text{C}_3\text{A}$  tenga el cemento P ó PY ensayado mayor  $\bar{\Delta}\text{L}$  proporcionarán sus probetas respectivas.

No obstante llama poderosamente la atención el hecho ya referido, en cierta medida en la interpretación VII.4.1.1.1.1ª (POP), y es que de ser constante la cantidad de  $\text{SO}_3$ , 7,0%, con la que tienen que reaccionar todos y cada uno de los cementos P ó PY así ensayados, y poder fijar ésta por estequiometría un 7,87% de  $\text{C}_3\text{A}$  para pasar a ett-lf, todos aquellos cementos, cuyo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  fuere superior a dicho valor, caso del P-1 (14,11%  $\text{C}_3\text{A}$ ), P-2 (11,09%  $\text{C}_3\text{A}$ ), P-4 (10,71%  $\text{C}_3\text{A}$ ) y P-32 (9,30%  $\text{C}_3\text{A}$ ) ensayados, habrán de originar igual

cantidad de ett-lf (sobrantes  $C_3A$  a todos ellos, tanto más cuanto mayor fuese su contenido), y por tanto producir igual, a igualdad de edad del ensayo, en sus probetas respectivas, lo que se traduciría obligatoriamente en una cierta igualdad también entre sus valores respectivos de Poros,  $V_u$  y  $SO_3$  de sus líquidos de conservación, ¡Y eso no ha ocurrido! como se puede ver en las Tablas 26, 27, 28, 29 y 30 correspondientes—y pese a que el grado de sensibilidad de los parámetros Poros y  $V_u$  es bastante escaso—; ya que lo ocurrido ha sido lo inicialmente expuesto en esta interpretación, es decir, que el  $\Delta L$  de las probetas respectivas ha aumentado con el cociente

$$\frac{\% C_3A}{\% SO_3} = 7,0\% = \text{cte.}$$
, o sea, que por unidad de  $SO_3$  ha habido más uni-

dades  $C_3A$  rodeándola conforme mayor ha sido el contenido de  $C_3A$  del cemento P ensayado. Todo ello coincide prácticamente con la conclusión VII.4.2.11\* (POP), sobre que el mecanismo de expansividad inherente a la formación de ett-lf y ett-rf y asimilable al modelo de "through-solution", para poder ser total en toda la masa deberá de serlo fraccionadamente por zonas puntuales uniformemente repartidas, es decir, la resultante de la suma de los infinitos mecanismos similares repartidos puntual y homogéneamente por toda ella, los cuales podrían ser en tal caso asimilables igualmente al modelo topoquímico o reacción sólido-líquido con o sin disolución previa y/o en conjunto a la suma total, ó no, de ambos.

Por otra parte obsérvese como todos los cementos portland así en ensayados cuyo contenido de  $C_3A$  ha sido superior al 7,95% (> 7,0%  $SO_3$ ), caso del P-1, P-2, P-4 y P-32, vease Tabla 11, han estabilizado el crecimiento,  $\Delta L$ , de sus probetas respectivas entre las edades de 60 y 90 días, lo cual viene a indicar, que en dicho espacio de tiempo ha debido finalizar casi toda la reacción de formación de ettringita de tal origen  $C_3A$ , o ett-lf, y que la velocidad de difusión del agua de conservación por los poros de cada familia de probetas respectivas ha debido de ser bastante aproximada en sus probetas de mortero selenitoso respectivas hasta dicho periodo de tiempo. No obstante al ensayarlos de igual modo mediante el método H-1, ha ocurrido lo contrario.

En cambio a aquellos otros cementos portland de contenido de  $C_3A$  inferior al 7,87%, caso del resto P-31, P-5, PY-5, PY-1, PY-2,

PY-3, PY-4, PY-6, vease Tabla 11, igualmente ensayados con 7,0% ó 21,0% de  $\text{SO}_3$ , les ocurrió

- lo contrario, en el primer caso, 7,0%  $\text{SO}_3$ , pues sus probetas respectivas estabilizaron su crecimiento a edades posteriores a la de 90 días y tanto más posteriores cuanto menor ha sido el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  de su cemento portland constitutivo y viceversa, señal inequívoca de que en esta ocasión y con tal grupo de cementos portland, aún no ha debido finalizar en sus probetas de mortero selenitoso respectivas y a la edad de 60 días, la cantidad total previsible de ettringita respectiva a formar (en los que haya lugar únicamente), por haber cantidad de yeso suficiente y mayor por tanto que la necesaria por estequiometría para cada uno de ellos, y
- otro tanto, en el segundo, 21,0%  $\text{SO}_3$ , por idénticas razones afines anteriores.

Y como confirmación de todo está el hecho de la coincidencia prácticamente TOTAL alcanzada entre las clasificaciones de dichos cementos portland, 6 P y 6 PY, así ensayados,

- en función del contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  y
- en función del valor del  $\bar{\Delta}\text{L}$  a las edades finales del ensayo, edades a las que lógicamente el mecanismo topoquímico ha debido finalizar, originando  $\bar{\Delta}\text{L}$  distintos y proporcionales a su contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  respectivo, como así ha ocurrido en este trabajo en el método n-1.

Por otra parte y en cuanto a la causa de la mayor coincidencia habida entre las clasificaciones resultantes de los cementos portland 6 P y 6 PY, ensayados mediante el método ASTM C 452-68, que ensayados mediante el método L-A ó H-1, y su contenido respectivo de  $\text{C}_3\text{A}$ , se ha de decir que la misma forzosamente ha de estribar en el mismo fundamento del por qué la ganancia en coincidencia obtenida en los tres métodos de ensayo L-A, ASTM C 452-68 e H-1, a medida de que el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento portland ensayado disminuía y viceversa,

es decir, a medida que disminuía la formación correspondiente de ett-lf. De aquí que como potencialmente y en caso de cemento portland P de contenido de  $C_3A$  superior al 7,87% ( $7,87\% C_3A < 7,0\% SO_3$ ) - pues en los de inferior contenido con más razón -, la formación posible de la ett-lf total correspondiente es menor en el método ASTM C 452-68 que en el L-A y/o el H-1, - por ser estequiométricamente deficitario el primero, que no los segundos -, menor deberá ser, por la razón anterior, la falta de coincidencia entre las clasificaciones derivadas correspondientes del primero que las derivadas correspondientes de los segundos, como así ha ocurrido en este trabajo. Por eso mismo, las del primero deberán mantenerse prácticamente durante todo el ensayo, mientras que las de los segundos, L-A e H-1, no; debiendo variar conforme transcurre el mismo - como así también ha ocurrido en este trabajo -, pero no dando tiempo a ser todas ellas coincidentes como en teoría así debiera, al menos las de estos métodos citados, L-A e H-1, porque los sistemas, torta y probetas, respectivos, son totalmente distintos, de modo y manera que a mayor contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado y por la razón correspondiente apuntada en la interpretación VIII.1.2.1. (E) (F), 1ª anterior, la forma torta deberá permanecer tal cual y mejor que la forma probeta. De aquí que ésta se fracture y desmenuce antes que aquella haciéndose por tanto más importante aún el estudio comparado conforme transcurra el ensayo, como así ha ocurrido en este trabajo, con el H-1 que con el L-A.

De la Discusión 3ª: Los tres casos anómalos existentes citados anteriormente más el correspondiente, como se verá, al P-31, pertenecen a parejas de cementos comprendidas en zonas del espectro de variabilidad en el contenido de  $C_3A$  de los cementos portland (del 0% al 15% aproximadamente) diferentes, de donde al no contener teóricamente, una de aquellas, la formada por los cementos PY-4 y PY-6,  $C_3A$ , induce a pensar que la causa u origen de la anormalidad en este caso es distinta a la del resto de las parejas citadas, la P-2 y P-4, y la PY-5 y PY-1, donde como causa común se puede adscribir la formación de una mayor (caso del P-2 y P-4) o menor (caso del PY-5 y PY-1) cuantía de ett-lf. Por todo lo cual y en vista de que el contenido de  $C_3S$  del cemento PY-6, 79,43%, es bastante mayor que el del PY-4, 58,19%, una causa probable bien podría ser la ya apuntada al respecto en la 2ª parte de la interpretación VIII.1.2.1. (L-A).

Y en relación con los otros dos casos, pareja P-2 y P-4, pareja PY-5 y PY-1, de anormalidad ocurridos, únicamente cabe destacar que, aproximadamente les ha acaecido otro tanto aunque en menor medida a todos ellos, en el ensayo L-A; de donde cabe pensar que el distinto tipo, forma, tamaño (finura) y grado de cristalinidad de sus componen-

tes mineralógicos (puesto que la sup. esp. es menos heterogénea en el origen de dicho ensayo L-A),  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ , y sus consecuencias a la hora de su hidratación respectiva, podría ser la causa de tales "anormalidades" a dichas edades tempranas (hasta los 60 días de edad) citadas. De donde se deduce que si tales anormalidades citadas ocurrieren de hecho entre cementos portland "frontera" del valor límite ó diferenciador del 5,0% de  $C_3A$ -que como se sabe separa a los portland de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato de los que no lo son tanto-, indudablemente a la hora de clasificarlos como P ó PY, sería más indicativo, para el especialista, el grado de resistencia potencial del mortero correspondiente del cemento ensayado al citado ataque sulfático, mediante el ensayo físico, o sea que, el  $\bar{A}L(\%)$ , a los 14 días de edad de las probetas que sea menor que 0,040% para los cementos PY ó tipo V USA, que mediante la(s) limitación(es) química(s), dado que aquél (mortero) pese a la gran distancia que lo separa de la realidad más común (hormigón), indudablemente se encuentra más "próximo" a dicha realidad que la(s) citada(s) limitación(es) química(s).

Por otra parte y en cuanto a la participación en la consecución - de los valores de las RMF y RMC y parámetros derivados de los múltiples compuestos hidratados originados citados anteriormente, se confirma igualmente que la  $ett-lf$  formada juega un papel fundamental en aquellos, tanto en cuanto a su cantidad formada como cuanto a su velocidad de formación. Por ello que la consecución tanto más rápida de mayores valores absolutos de RMF y RMC (y lógicamente lo correspondiente a sus parámetros derivados respectivos), cuanto mayor ha sido el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, y viceversa, haya de serle imputada a la misma y su  $V_f$  correspondiente; que, por los hechos, debe de ser bastante superior a la de los  $C_3S.H_{x,y,z}$  originados a la par; debiendo ocurrir lo contrario tanto a las edades posteriores (es decir, la lógica mayoría de estos últimos por la probable nulidad de formación de aquella al haberse "consumido" para entonces su  $C_3A$  originario), caso de los cementos P-1, P-2, P-4, P-32, P-31 y P-5, principalmente, como durante todo el ensayo, cuando aquella se ha de formar escasamente por ausencia prácticamente total de  $C_3A$  en el cemento portland ensayado, caso del PY-4, PY-6 y similares.

Interpretación VIII.2.2.1.(G)(H)(I) (pero siguiendo el orden de las discusiones de la (G)).

Finalmente y por su trascendencia, no deseamos terminar esta interpretación de este apartado sin la parte expresa correspondiente al parámetro Porosidad, la cual es como sigue:

De la Discusión 1ª: Es evidente que nada mas sumergir las probetas en su agua de conservación correspondiente, su fracción conglomerante aún anhídrica, que es la mayor parte, se hidratará para dar con prontitud múltiples compuestos de calcio hidratados cementantes, colmatantes y mas o menos expansivos, de aquí que tenga que disminuir notoriamente la porosidad de todas las probetas, como así ha ocurrido en este trabajo.

Por el contrario y a partir de dicha edad de 7 días, se observa como la característica expansividad de la  $ett-lf$  y su influencia, entre otros, en la porosidad de las probetas, comienza a superar a la del resto de los compuestos de calcio hidratados anteriores, formados mas o menos al unísono con aquella. Y ello se puede confirmar por dos hechos comunes y diferentes a un tiempo, pese a la diferencia grande o pequeña que pueda existir de un cemento a otro:

a) Porque sea cual fuere el cemento P ó PY ensayado, a mas  $C_3A$  posea, mas  $ett-lf$  expansiva podrá, en teoría, formar y consiguientemente mayor expansividad, porosidad y consumo de  $SO_3$  del 7,0% inicial, podrá provocar en sus probetas correspondientes; y eso seguirá ocurriendo hasta que por carencia, mejor "consumo total", de uno de los reactivos,  $C_3A$  ó  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , según el contenido de  $C_3A$  de los cementos portland aquí ensayados, dicha formación continuada de  $ett-lf$  llegue a anularse mas pronto o mas tarde, a partir de cuyo momento, la porosidad residual resultante se debería ir colmatando y taponando con el progreso de la hidratación selenitosa ulterior merced a nuevos productos de hidratación, no tan nocivos como aquella y de origen  $C_3S$  y/o  $C_2S$  residuales anhidros principalmente. De aquí que todo ello se deberá traducir lógicamente, en la disminución gradativa posterior de tal aumento de porosidad "provocada" previamente, como así ha ocurrido en este trabajo.

Y en el supuesto de que hubiese habido cantidades en exceso de  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  agresivo para todos los cementos portland ensayados, como ha ocurrido en las probetas correspondientes del método de



ensayo H-1, con 21,0% de  $\text{SO}_3$  en su mezcla-conglomerante respectiva, que se verá mas adelante-, dicha formación de tt-lf, no se hubiese anulado tan pronto, continuando por mucho mas tiempo, sobre todo en aquellos de contenido mediano y alto de  $\text{C}_3\text{A}$ , en cuyas probetas progresaría su formación con el transcurso del ensayo, aumentando consiguientemente la porosidad de las mismas, en cuyo caso el valor máximo de tal porosidad se iría desplazando hacia edades mayores o posteriores, llegando incluso a coincidir en ocasiones con la edad de autodestrucción de las mismas, como así ha ocurrido en este trabajo, véase Tabla 28.

- b) Del mismo modo y por idéntica razón anterior, los valores de la porosidad de las probetas deberán aumentar, a igualdad de edad, con el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  de su cemento P ó PY constitutivo, como así ha ocurrido también en este trabajo, véase Tabla 26.

Por otra parte se ha de destacar también de la evolución mas bien común en todos los casos y a lo largo del ensayo, (con las diferencias notorias y escasas, de uno a otro cemento, denunciadas), de los valores de porosidad de sus probetas respectivas, y puesto que la génesis de la ettringita lleva pareja una expansividad manifiesta, que la misma puede ser, a la vista de lo anterior citado, además de expansora, coimatante, imperando las consecuencias de una u otra acción, según el grado de endurecimiento de la probeta; de aquí que al ser lógicamente, el mismo, menor a las edades iniciales que a las intermedias, durante las primeras deberá imperar la colmatación, y viceversa durante las segundas (siempre y cuando, claro está, estése formando ettringita), como así ha debido ocurrir en esta parte del trabajo, a tenor de los resultados, y su evolución en el tiempo, obtenidos.

Finalmente y referente al hecho denunciado de la mayor proximidad existentes, entre las fechas de consecución del máximo de porosidad en sus probetas respectivas, entre los cementos P-1, P-2, P-4, P-32 y P-31, que entre el resto, se puede deber al hecho de que en todos ellos, en teoría y por estequiometría, se debe de llegar a formar idéntica cantidad de ettringita ( ó "consumirse" idéntica cantidad de  $\text{C}_3\text{A}$  para formarla), ó lo que es lo mismo idéntica o al menos parecida cantidad de porosidad, ó en su defecto y puesto que la sup. esp. del cemento también debe de influir de alguna manera, la consecución de la máxima cantidad de la misma a edades del ensayo

relativamente próximas, tanto más próximas cuanto más próximo al 7,87% ( $7,87\% C_3A < > 7,0\% SO_3$ ) sea el contenido de  $C_3A$  del cemento portland y viceversa, en cuyo caso, cada la menor cantidad de  $C_3A$ , otras características del cemento portland ensayado en cuestión, deberán influir notoriamente en la edad de consecución de su máximo de porosidad respectivo, como así ha ocurrido en este trabajo.

De la Discusión 2ª: Vale aquí la interpretación dada a propósito para este parámetro porosidad en el caso de la puzolana M, es decir, a más M, más  $Al_2O_3$ , más ettringita y más poros, y a más  $C_3A$  otro tanto.

De la Discusión 3ª: Referente a esta discusión, únicamente cabe reseñar, que según la misma se tiene que discrepar de otros investigadores (253) que afirman que este parámetro porosidad, determinado mediante esta técnica experimental, puede servir como "índice de valoración de la estabilidad química de una probeta", pues la variabilidad de sus  $\bar{\Delta L}$  respectivos ha sido mayor que la de sus valores de porosidad correspondientes, que no lo han sido tanto, y en comparación con aquellos,  $\bar{\Delta L}$ , podría llegar a decirse incluso que nada.

Y respecto al resto de los parámetros, dentro de sus posibilidades, abundan sobre todo lo dicho anteriormente.

No se desea terminar esta interpretación VIII.2.2.1, sin hacer hincapié sobre el método en cuestión y su especificación correspondiente que como se sabe es que el  $\bar{\Delta L}_{14 d.}$  de las probetas del cemento portland ensayado, no ha de sobrepasar el valor del 0,040%, para que el mismo pueda ser calificado de elevada RS. Pues bien, por las razones dadas en el :

a) apartado (b) de la interpretación correspondiente a la 1ª Discusión anterior,  $7,0\% de SO_3 < > 7,87\% de C_3A$ , y

b) antepenúltimo párrafo de la interpretación VIII.2.2.1. (E), 2ª,

el valor del  $\bar{\Delta L}_{14 d.}$  no indica forzosamente que a tal edad se haya producido en todos los cementos portland así ensayados, la mayor parte de la Vcl de sus probetas respectivas, o lo que es

lo mismo, la totalidad o al menos la mayor parte de las reacciones expansivas respectivas, como así lo confirman los valores correspondientes a dicho parámetro, véase Tabla 25 pese a lo cual dicho valor del  $\bar{\Delta}L_{14d}$  del 0,040% se utiliza para tal fin, su calificación y cualificación correspondiente.

Por otra parte, tal especificación actual, del 0,040% máximo a la edad de 14 días de las probetas, ha surgido como consecuencia de las modificaciones sufridas por una no normalizada, informal y primitiva del 0,059% a la edad de 28 días, obtenida por Biczok (142) del Bull. ASTM nº 212 (210) a través de la Tabla 31 en la cual a la tradicional limitación puramente química del 5% de  $C_3A$  existente para los cementos portland de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, le correspondería dicho valor anterior. Esta del 0,59% a la edad de 28 días se mantendría informalmente hasta el año 1970, a partir del cual pasaría a ser del 0,045% a la edad del ensayo de 14 días, para finalmente en el año actual pasar a ser del 0,040% a esta última edad citada, que es como se la conoce y ha de admitir en la actualidad, siendo por tanto 5 milésimas menor que la anterior a igual edad.

Tabla 31  
ASTM C 452-68

Tipo de Cemento Portland	Contenido de $C_3A$ (%)	$\bar{\Delta}L$ (%) 28 días	$\bar{\Delta}L$ (%) 365 días	
P	12	0,224	1,000	escasa RS I
	11	0,119	0,689	
	10	0,104	0,285	
	9	0,073	0,273	
	7	0,060	0,170	
	5	0,062	0,216	
PY	5	0,059	0,164	moderada RS II
	4	0,050	0,120	
	3	0,041	0,101	
	2	0,038	0,087	
	1	0,037	0,080	
		0,037	0,080	
* a los 84 días		(0,059-0,008-0,054)		elevada RS I

Asimismo en principio y al igual que en el caso anterior, para los cementos portland de "moderada resistencia al ataque de los iones sulfato" se podría adoptar el valor máximo alcanzable a la edad de 28 días de sus probetas correspondientes, del 0,062%, el cual surgiría del valor de  $\bar{\Delta}L$  que le corresponde, según dicha Tabla 31 al valor de 8% de  $C_3A$  adscrito por la norma ASTM C 150-84 a los cementos

portland de "moderada resistencia al sulfato", y que al no encontrarse en la misma habría de obtenerse mediante la media aritmética correspondiente al anterior y posterior a aquél, o sea 9% y 7% ó 9% y 6% según convenga, de aquí que dicho valor medio de  $\bar{\Delta}L$  sería el 0,067%, obtenido entre 0,073% y 0,060% y/o 0,073% y 0,062% respectivamente, disminuyéndolo en las 5 milésimas de rigor, al igual que en el caso anterior. No obstante y puesto que con esta especificación habrían de considerarse como "de elevada RS" a cementos portland, P-31 (7,62% de  $C_3A$ ) y P-5 (6,83% de  $C_3A$ ), que no los son, pues por la especificación química correspondiente de la norma ASTM C 150-84a ambos han de ser considerados como de "moderada RS" por ser sus contenidos respectivos de  $C_3A$  menores del 8%, habrán de ser valores de  $\bar{\Delta}L_{28d}$  de los obtenidos por Biczok, ver Tabla 31, junto con los correspondientes a tales cementos aquí ensayados, lo que nos proporciona algún valor ó entorno, de valores próximos de  $\bar{\Delta}L$ , buscado para tal fin, el cual habría de ser como máximo del 0,073% a la edad de 28 días; según lo cual aún se seguiría cometiendo el error de considerar al cemento portland P-31 como de "escasa RS" cuando en realidad no debe de serlo ... ya que las especificaciones puramente químicas, véase norma ASTM C 150-84a, - surgidas otrora de los cálculos teóricos de Bogue, cuyas limitaciones y falta de exactitud total, así como de los datos de que se parten para obtenerlos, son de todos conocidos, habiéndose modificado recientemente y por tal motivo el valor 0,045% a 0,040% de  $\bar{\Delta}L_{14d}$ . (%) máximo para los cementos portland de "elevada RS"- así lo dictaminan. Pero ello es idéntico tributo, lógicamente corregido y aumentado, que el que se ofrece en la actualidad en igual sentido con la especificación actualmente en vigor, antes citada, para los cementos portland de "elevada RS".

A continuación cabe citar aquí íntegramente el párrafo final de la interpretación VIII.3.3.1.

Por último y puesto que este método acelerado de ensayo ASTM C 452 es obviamente el de mayor trascendencia internacional, se desea realizar respecto a él, el estudio comparativo de las diversas clasificaciones obtenidas, de mayor a menor valor, correspondientes a los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, a las edades fundamentales del ensayo, respectivas, en función,

- a) del contenido de  $C_3A$  de cada uno de ellos,
- b) del  $\Delta\phi$  de la torta correspondiente a su ensayo mediante el método

c) del  $\Delta L$  de las probetas correspondientes a su ensayo mediante el método ASTM C 452-68 e H-1, respectivamente, y que son las que figuran en la Tabla 27, donde se observa que la obtenida mediante el método acelerado de ensayo ASTM C 452-68 ha resultado ser la más concordante en general de todas con la primera, o sea, con la obtenida mediante el contenido de  $C_3A$  de cada uno de ellos.

¿ Puede ser ello indicio suficiente para poder decir que el presente método acelerado de ensayo ASTM C 452-68 es el más preciso de los tres comparados, L-A e H-1 ?.

Pensamos que no, dado que el estudio comparativo, para ser más concluyente y definitivo, debería haberse hecho, o realizarse en el futuro, a igualdad, al menos, de contenido entre otros de  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_4AF$ , tipo de forma cristalina de cada uno de ellos y en especial del  $C_3A$  y finura de molido o superficie específica de los cementos portland ensayados (siendo tecnológicamente este último el más factible de todos), lo cual no ha podido realizarse en este trabajo por no haberse incluido expresa y obviamente el objetivo anterior en el mismo.

Y por último y respecto a los parámetros RMF y RMC se ha de decir que la relación directa existente entre los valores de los mismos a las edades iniciales del ensayo y el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, ha de ser fruto necesariamente de la formación de la ett-1f correspondiente a cada caso y su participación proporcional respectiva en el mismo; la cual y en el supuesto quizás falso de que únicamente actuase colmatando -hecho éste bastante improbable a tenor de los valores correspondientes al resto de los parámetros coordinados, que dicen lo contrario-, se apoyaría la hipótesis del mecanismo de through-solution para la formación de la ett-1f, en perjuicio de los restantes mecanismos. De aquí que según la relación directa entre tales valores de los parámetros citados antes, no debe de ser en exclusiva dicho mecanismo el más favorecido y si en cambio algún otro de los indicados en el apartado IV.1, preferentemente el topoquímico, con o sin disolución previa, pues según el mismo al deber estar repartidos uniformemente al azar por toda la masa del mortero de la probeta las partículas del clínker y con ellas las de  $C_3A$  originario de la ett1f a formar, unas deberán caer enfrentadas al menos a un poro, y otras deberán estar rodeadas de pasta colmatante; pues bien mientras que la ett-1f de las primeras podrían colmatar además de expandir, la de las segundas sería al contrario en exclusiva, de aquí al poder expansivo y colmatante confirmado con el resto de los parámetros empleados.

-----  
NOTA (\*).- En  $SO_3$  (7,0% contra 15,50% y 21,0% respectivamente).

ASTM C 452-68

(7,0 % SO<sub>3</sub>) Edad: 90 días

(P 12/5) = (80/20) e.p. I d

P II d = (50/50) = (4/21) d

(P 12/10) = (70/30) e.p. III d

P IV d = (10/90) = (4/21) d

0,68

0,71

0,75

0,84

D 91,81% SiO<sub>2</sub>  
1,91% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

ASTM C 452-75

(7,0 % SO<sub>3</sub>) Edad: 90 días

(P 12/5) = (80/20) e.p. I d

(P 12/10) = (70/30) e.p. III d

(P 12/10) = (60/40) e.p. IV d

a/c = 0,485

P-1 14,11% C<sub>3</sub>A

ASTM C 452-68

(7,0 % SO<sub>3</sub>) Edad: 90 días = 730 días

P<sub>11</sub> 3

a/c = 0,51

(PY-6) 79,43% C<sub>3</sub>S  
0,00% C<sub>3</sub>A

HIBRIDO -1

(21,0 % SO<sub>3</sub>)

(PY-4) 58,19% C<sub>3</sub>S  
0,00% C<sub>3</sub>A

PY-6  
PY-4

0,50

0,50

(PY-6)

(PY-4)

VIII.2.2.2.- De los Cementos de Mezcla PA y/o PUZ y PUZ industriales:

Todos los valores del parámetro  $\bar{\Delta}L$ , obtenidos de las puzolanas D, N, M, CV-10 y CV-19, se encuentran enmarcados,

- ó bajo la letra "d" de "desconocida", que significa que a cada cemento de mezcla citado se le ha determinado "su" agua de amasado a escurrimiento constante (flow = cncte.), o sea, mediante el método de la "mesa de sacudidas",
- ó bajo la letra "c" de "conocida", que significa que a cada cemento de mezcla citado se le ha añadido la misma cantidad de agua de amasado, o sea, 194 ml. para 1500 g. de mortero.

Por otra parte se ha de hacer constar que el Coeficiente de Desviación de los distintos tipos de valores obtenidos ha sido diferente según el parámetro al que pertenezcan, así,

- el de la RMF, ha oscilado entre el 1,65% y el 4,44%
- el de la RMC, ha oscilado entre el 2,36% y el 3,97%

VIII.2.2.2.1.- Cementos de Mezcla preparados con la Puzolana Referencial Silícica D,

Discusión VIII.2.2.2.1

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$ , vease Tabla 32 y 26.

1.- Sea cual fuere el cemento de mezcla de que se trate, la evolución de los valores del  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respectivas, es de, aumento gradativo conforme transcurre el ensayo, siendo tal aumento, por lo general, del mismo sentido pero menor cantidad, a como ocurriere en su cemento portland matriz constituyente respectivo, P ó PY, solo, con la única diferencia que la aminoración, hasta su práctica constancia hata el final del ensayo, se produce por lo general en cualquiera de los de mezcla citados, entre las edades de 60 a 150 días, y no entre las edades de 28 a 60 ó 90 días, como en aquellos P ó PY, solos, y

distinta de unos a otros, aún dentro de la misma familia, pero teniendo únicamente en común los tres cementos de mezcla de la misma, 80/20, 70/30 y 60/40, que la aminoración de su crecimiento anterior, se suele producir, por lo general, a la edad común de 120 a 270 días.

Tales generalidades citadas son también comunes, en el fondo, - para las probetas de los cementos de mezcla anteriores preparadas con agua de amasado c, pese a que no se hayan curvado, véase Fot. 5.

Y respecto al parámetro  $V_{cl}$ , se puede decir que ocurre lógicamente todo lo contrario, principalmente en lo que se refiere a la primera parte y fundamental de esta discusión, alcanzándose, por lo general, el máximo valor absoluto de la  $V_{cl}$  en todos los casos en los primeros 28 días del ensayo, excepto en los cementos de mezcla anteriores citados, P-1/D 80/20 y P-1/D 70/30, que lo alcanzan durante los primeros 90 días del mismo.

- 2ª.- Se puede decir que en general, en casi todas las familias de cementos de mezcla PA y PUZ preparados con esta puzolana D y así ensayados, durante todo el ensayo, el  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$  de sus probetas respectivas disminuye con la cantidad de puzolana D añadida, excepto en las primeras edades las probetas de la familia P-4/D, y hasta la edad de 365 días las de la familia P-5/D. No obstante y en cualquier caso, a igualdad de edad del ensayo, y sea cual fuere la relación a/c, los valores de las probetas, del cemento matriz acompañante correspondiente P ó PY sólo , resultaron ser mayores que cualquiera de aquellos, es decir,

$\bar{\Delta}L$	P - n° ó PY - n°/D ;	100/00	>	80/20	>	70/30	>	60/40	p.f.e.
$V_{cl}$									

Por lo tanto se puede decir con fundamento que impera el efecto químico inverso de la sustitución física, ó "efecto de un inerte<sub>RS</sub> aparente", de cemento P ó PY por puzolana D.

- 3ª.- Por lo general, a igualdad de edad, cemento de mezcla PA ó PUZ y agua de amasado, c ó d, el  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$  de sus probetas respectivas disminuye proporcionalmente con el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY.

- 4ª.- Igualmente y en razón de las discusiones anteriores, 2ª y 3ª, esta puzolana D, añadida a cualquier cemento P ó PY, elegido para este trabajo, hace que los cementos de mezcla PA 80/20 y PUZ 70/30 y 60/40 preparados con aquella, proporcionen para una misma edad de las ensayadas, un  $\bar{\Delta}L$  menor que el correspondiente a aquél P ó PY solo, correspondiéndose el mismo con el de los cementos portland que tengan un contenido de  $C_3A$  menor, en 1, 2 y 3 unidades de  $C_3A$ , al de aquél P ó PY, respectivamente.

Por lo tanto y en definitiva, sea cual fuere el cemento de mezcla PA ó PUZ de que se trate, el  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respecti-



vas a una edad dada, es menor que el porcentaje respectivo del  $\bar{\Delta}L$  de su cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY solo, es decir,

	$80\% \times \bar{\Delta}L \text{ P-n}^\circ \text{ ó PY-n}^\circ > \bar{\Delta}L \text{ P-n}^\circ \text{ ó PY-n}^\circ / D \text{ 80/20}$	
$< \bar{\Delta}L <$	$70\% \times \bar{\Delta}L \text{ P-n}^\circ \text{ ó PY-n}^\circ > \bar{\Delta}L \text{ P-n}^\circ \text{ ó PY-n}^\circ / D \text{ 70/30}$	p.f.e.
	$60\% \times \bar{\Delta}L \text{ P-n}^\circ \text{ ó PY-n}^\circ > \bar{\Delta}L \text{ P-n}^\circ \text{ ó PY-n}^\circ / D \text{ 60/40}$	

5ª.- Las consecuencias de las discusiones anteriores se materializan de un modo interesante en los cementos P-5, PY-5 y PY-1, "fronte-ra", anterior y posteriores respectivamente del valor 5,0% de  $C_3A$  que separa a los portland en dos tipologías distintas, los de elevada, ó no, resistencia al ataque de los iones sulfato. De aquí que los resultados experimentales obtenidos confirmen que el cemento portland P-5 con un contenido de  $C_3A$  del 6,83% (de "no elevada resistencia sulfática" según la norma ASTM C 150-83a y RC-75), al añadirle, simplemente un 20%, un 30%, ó un 40%, en peso, de esta puzolana D, origina unos cementos de mezcla PA, tales como el P-5/D 80/20, y PUZ, P-5/D 70/30 y P-5/D 60/40, que a igualdad de edad y durante todo el ensayo, proporcionan unos  $\bar{\Delta}L$  en sus probetas respectivas,

- caso del cemento de mezcla PA P-5/D 80/20,
  - . menores que los de las probetas del cemento PY-5 (4,50%  $C_3A$ ) solo, (cemento portland siguiente al P-5, en la escala de mayor a menor contenido de  $C_3A$ ), y
  - . similares a los de las probetas del cemento PY-1 (3,83%  $C_3A$ ) solo, (cemento siguiente al PY-5 anterior, en la escala antes citada), y
- caso de los cementos de mezcla PUZ, P-5/D 70/30 y P-5/D 60/40,
  - . menores que los de los cementos PY-5 y PY-1, solos antes citados.

6ª.- Asimismo se ha de destacar que a la edad final del ensayo, los cementos de mezcla PA ó PUZ preparados con los cementos portland matrices PY-4 ó PY-6, continúan, por lo general, expandiendo, aunque muy poco. Este hecho no ocurre con igual generalidad en el caso de los cementos de mezcla homónimos de cemento matriz acompañante P.

7ª.- Se ha de destacar también, como en el caso concreto de los cementos de mezcla PA ó PUZ preparados con el cemento portland

matriz PY-4 y el cemento portland matriz PY-6, respectivamente, a igualdad de edad y cemento de mezcla ocurre que,

$\Delta \bar{L}$	PY-4/D 80/20 ó 70/30 ó 60/40 < PY-6/D 80/20 ó 70/30 ó 60/40	p.f.e.
------------------	---	--------

- 3ª.- En general, todo lo discutido hasta ahora es totalmente válido para ambos tipos de probetas, las confeccionadas con  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$ , y las confeccionadas con la  $\frac{a}{c} = c = \text{cte.}$  No obstante de los 30 cementos de mezcla preparados con la puzolana D y así ensayados, 24 amasados con relación  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$ , originaron unos valores del  $\Delta \bar{L}$  de sus probetas correspondientes mayores que la relación  $\frac{a}{c} = c = \text{cte.} = 0,485$ ; 5 los originaron al contrario, y uno, el P-31/D 60/20, con alternancias apreciables, en la mayoría respectiva, a lo largo del ensayo.
- 9ª.- De los 60 cementos de mezcla PA y PUZ preparados con esta puzolana referencial silícica D, y así ensayados,
- 30 (50,00%), han resultado ser de elevada RS, puesto que el  $\Delta \bar{L}_{28d} \leq 0,054\%$ , según la Tabla 31 y la parte final de la interpretación VIII.2.2.1,
  - 5 (8,33%), han resultado ser de moderada RS, puesto que  $0,054\% \leq \Delta \bar{L}_{28d} \leq 0,073\%$ , según las referencias anteriores, y
  - 25 (41,67%), han resultado ser de baja o escasa RS, puesto que el  $\Delta \bar{L}_{28d} \geq 0,073\%$ , aunque a determinadas edades, caso del P-1/D 60/20 y P-1/D 70/30, pareciera lo contrario por los resultados engañosos proporcionados por este método acelerado de ensayo ASTM C 452, que no, como se verá, por el H-1.
- 10ª.- Sea cual fuere la familia de los cementos de mezcla PA y PUZ preparada con esta puzolana D, y así ensayada, la relación  $\frac{a}{c} = c$ , aumenta con la adición de dicha puzolana, véase Tabla 34, de modo que en cualquier caso el valor de la misma queda comprendido entre 0,60 y 1,0.

a) Tipo de prueba: "P" (ASTM C 452-68)  
b) Propiedades (f) medidos en el mismo:  $f_c$  (MPa) y  $V_{ci}$  (%  $\bar{V}_{ci}/100$ )

TABLA 32

c) Fotografía(s) correspondiente(s) a la serie  
Tamaño: 100x100

(S) No	CEMENTO P-1/PUZOLANA 0			CEMENTO P-2/PUZOLANA 0			CEMENTO P-4/PUZOLANA 0			CEMENTO P-32/PUZOLANA 0			CEMENTO P-31/PUZOLANA 0		
	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$
EDAD (días)	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40
7	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1
14	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7
21	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3
28	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2
60	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2
90	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7
120	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0
150	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4
180	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8
270	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8
365	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7
545	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7
730	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7
(S) No	CEMENTO P-5/PUZOLANA 0			CEMENTO P-11/PUZOLANA 0			CEMENTO P-11/PUZOLANA 0			CEMENTO P-4/PUZOLANA 0			CEMENTO P-4/PUZOLANA 0		
	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$
EDAD (días)	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40
7	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1
14	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7
21	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3
28	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2
60	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2
90	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7
120	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0
150	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4
180	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8
270	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8
365	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7
545	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7
730	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7
(S) No	CEMENTO P-5/PUZOLANA 0			CEMENTO P-11/PUZOLANA 0			CEMENTO P-11/PUZOLANA 0			CEMENTO P-4/PUZOLANA 0			CEMENTO P-4/PUZOLANA 0		
	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$	$f_c$	$V_{ci}$	$\bar{V}_{ci}$
EDAD (días)	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40
7	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1	38	47.1	48.1
14	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7	110	50.8	50.7
21	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3	158	64.3	64.3
28	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2	221	74.2	74.2
60	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2	372	147.2	147.2
90	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7	446	171.7	171.7
120	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0	509	190.0	190.0
150	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4	548	202.4	202.4
180	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8	584	214.8	214.8
270	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8	658	240.8	240.8
365	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7	709	261.7	261.7
545	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7	789	291.7	291.7
730	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7	859	317.7	317.7

ALL INFORMATION CONTAINED HEREIN IS UNCLASSIFIED

$\rho_2 = \frac{m_2}{V_2} = \frac{0.876 \text{ g}}{1.00 \text{ cm}^3} = 0.876 \text{ g/cm}^3$

TABLE 35

• **Estimul: 0 (1) cmrasanadestafa la este**

FORM NAC

[illegible]

[illegible]

o Fotografista / correspondente de arte  
Tania - 1982

[illegible]

• Tipo de prova: 15x15 cm e 15x15 1/4" ASTM C 452-08  
• Parâmetros: densidade (g/cm³) e massa (kg) e densidade (%) e (g/cm³)

TABLA 38

• Fotografias (s) correspondente(s) este  
Tabela: 38/33

ID	CEMENTO P-1 /PUZOLANA 0										CEMENTO P-2 /PUZOLANA 0										CEMENTO P-4 /PUZOLANA 0										CEMENTO P-32 /PUZOLANA 0										CEMENTO P-31 /PUZOLANA 0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	P		V		V <sub>0</sub>		P		V		V <sub>0</sub>		P		V		V <sub>0</sub>		P		V		V <sub>0</sub>		P		V		V <sub>0</sub>		P		V		V <sub>0</sub>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W	(g)	W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)	CEM (g)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30	70/30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
1	24.9	2.48	24.1	2.41	23.2	2.35	22.3	2.28	21.4	2.21	20.5	2.14	19.6	2.07	18.7	1.99	17.8	1.92	16.9	1.85	16.0	1.78	15.1	1.71	14.2	1.64	13.3	1.57	12.4	1.50	11.5	1.43	10.6	1.36	9.7	1.29	8.8	1.22	7.9	1.15	7.0	1.08	6.1	1.01	5.2	0.94	4.3	0.87	3.4	0.80	2.5	0.73	1.6	0.66	0.7	0.59	0.0	0.52	0.0	0.45	0.0	0.38	0.0	0.31	0.0	0.24	0.0	0.17	0.0	0.10	0.0	0.03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0

«Tipo de prueba: 1'11/16" ASTM C 455-09  
«Parámetro(s) medido(s) en el ensayo: G/100% y V/100% (d/s)

TABLA 39

«Fotografía(s) correspondiente(s) a este  
Tipo: N/A/2

Edad (días)	CEMENTO P-1 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-2 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-4 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-32 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-31 / PUZOLANA 0					
	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40			
7	18.2	1.46	38.9	1.41	43.8	0.73	8.4	0.88	29.2	1.37	45.3	0.48	4.3	4.88	31.2	1.25	46.7	7.10
14	21.5	1.38	36.3	0.78	46.2	1.28	22.7	1.22	36.8	1.38	42.3	1.25	18.4	1.58	42.8	1.28	36.8	1.28
21	25.8	0.72	42.1	1.58	75.8	1.45	25.9	0.32	46.3	1.08	36.3	1.28	24.1	0.18	46.8	1.28	36.3	1.28
28	28.4	0.28	52.2	1.41	86.1	1.41	28.5	0.83	52.5	0.28	49.8	1.28	28.2	0.28	56.8	1.27	33.8	1.31
40	42.8	0.35	52.1	0.28	98.8	0.40	43.1	0.53	49.8	0.31	108.1	0.25	41.2	0.41	98.3	0.28	38.2	0.17
60	47.2	0.88	74.1	0.25	104.2	0.18	44.2	0.88	71.8	0.33	108.2	0.19	42.8	0.88	71.8	0.33	108.5	0.18
90	48.3	0.88	74.1	0.28	104.8	0.22	47.2	0.88	72.8	0.88	108.3	0.22	45.4	0.11	75.8	0.27	108.2	0.11
120	48.3	0.88	74.1	0.28	104.8	0.22	47.2	0.88	72.8	0.88	108.3	0.22	45.4	0.11	75.8	0.27	108.2	0.11
150	48.3	0.88	74.1	0.28	104.8	0.22	47.2	0.88	72.8	0.88	108.3	0.22	45.4	0.11	75.8	0.27	108.2	0.11
180	51.2	0.28	75.1	0.20	103.2	0.28	51.3	0.28	75.1	0.20	111.8	0.12	52.3	0.11	75.8	0.20	111.8	0.12
270	51.2	0.28	75.1	0.20	103.2	0.28	51.3	0.28	75.1	0.20	111.8	0.12	52.3	0.11	75.8	0.20	111.8	0.12
365	54.1	0.28	83.1	0.28	118.3	0.28	54.2	0.28	83.1	0.28	118.3	0.28	54.2	0.28	83.1	0.28	118.3	0.28
545	55.2	0.88	89.8	0.28	112.3	0.28	55.3	0.28	89.8	0.28	112.3	0.28	55.3	0.28	89.8	0.28	112.3	0.28
730	55.3	0.28	89.8	0.28	112.3	0.28	55.3	0.28	89.8	0.28	112.3	0.28	55.3	0.28	89.8	0.28	112.3	0.28
Edad (días)	CEMENTO P-5 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-1 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-4 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-32 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-31 / PUZOLANA 0					
	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40			
7	25.8	1.46	46.3	1.28	9.2	12.28	28.9	0.12	58.3	0.23	42.8	0.88	38.8	0.58	46.3	0.15	41.2	0.18
14	31.8	0.88	71.3	1.22	118.8	1.25	32.7	0.82	68.1	1.18	58.3	1.28	45.4	0.38	61.2	1.38	58.3	1.28
21	41.8	1.18	68.1	1.18	137.8	1.85	38.8	0.88	98.3	1.28	72.3	1.21	52.3	1.28	75.1	1.38	108.3	1.21
28	48.8	0.27	108.3	1.28	158.8	2.21	47.8	1.08	89.3	0.88	89.3	1.28	48.8	1.08	89.3	1.28	118.3	1.28
40	48.3	0.28	108.3	0.28	172.8	0.58	50.7	0.27	108.3	0.28	89.3	0.21	48.3	0.21	108.3	0.28	118.3	0.28
60	51.8	0.28	108.3	0.28	182.8	0.28	52.8	0.21	108.3	0.28	89.3	0.21	52.8	0.21	108.3	0.28	118.3	0.28
90	51.8	0.28	108.3	0.28	182.8	0.28	52.8	0.21	108.3	0.28	89.3	0.21	52.8	0.21	108.3	0.28	118.3	0.28
120	51.8	0.28	108.3	0.28	182.8	0.28	52.8	0.21	108.3	0.28	89.3	0.21	52.8	0.21	108.3	0.28	118.3	0.28
150	48.3	0.28	118.3	0.28	198.8	0.19	54.2	0.28	108.3	0.28	89.3	0.21	54.2	0.28	108.3	0.28	118.3	0.28
180	48.3	0.28	118.3	0.28	198.8	0.19	47.8	0.28	108.3	0.28	89.3	0.21	47.8	0.28	108.3	0.28	118.3	0.28
270	51.8	0.28	118.3	0.28	172.8	0.28	41.8	0.28	108.3	0.28	89.3	0.21	41.8	0.28	108.3	0.28	118.3	0.28
365	51.8	0.28	118.3	0.28	172.8	0.28	41.8	0.28	108.3	0.28	89.3	0.21	41.8	0.28	108.3	0.28	118.3	0.28
545	51.8	0.28	118.3	0.28	172.8	0.28	41.8	0.28	108.3	0.28	89.3	0.21	41.8	0.28	108.3	0.28	118.3	0.28
730	54.2	0.28	118.3	0.28	172.8	0.28	41.8	0.28	108.3	0.28	89.3	0.21	41.8	0.28	108.3	0.28	118.3	0.28
Edad (días)	CEMENTO P-5 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-1 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-4 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-32 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-31 / PUZOLANA 0					
	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40			
7	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
14	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
21	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
28	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
40	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
60	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
90	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
120	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
150	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
180	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
270	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
365	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
545	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21
730	28.2	1.48	75.8	1.25	14.2	1.25	32.8	1.48	12.8	1.25	22.2	1.28	55.3	1.21	47.8	1.21	46.3	1.21



\*Light Curing Protection is in con. ASTM C 452-00

Perímetro(s) medido(s) en la misma Corriente de 30° a 150 (m/s) y Vy (m/s) (1 día)

TABLE A 40

12. Fotografías / correspondientes / e esta

Page: NACJ

DPA (m)	CEMENTO P-1 /PUZOLANA 0			CEMENTO P-2 /PUZOLANA 0			CEMENTO P-4 /PUZOLANA 0			CEMENTO P-32 /PUZOLANA 0			CEMENTO P-30/PUZOLANA 0			
	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	
7	92.7	90.5	85.4	115.5	97.7	111.2	70.1	12.3	105.3	119.6	92.7	12.5	73.2	108.3	86.5	122.8
14	97.5	91.3	77.1	121.8	95.3	1.2	77.1	1.2	84.7	93.4	98.5	6.3	79.2	8.2	82.9	6.2
21	99.1	93.5	74.2	121.2	97.2	1.2	77.2	1.2	91.3	1.2	91.3	1.2	79.8	6.5	94.2	5.1
28	99.7	93.8	75.2	121.2	98.6	2.7	77.5	1.9	93.8	7.8	79.2	4.3	86.5	7.8	97.2	2.1
40	99.9	94.2	76.2	121.2	99.2	2.7	77.5	1.2	94.3	1.9	77.5	1.2	87.2	7.1	97.2	1.2
90	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
120	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
150	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
180	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
270	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
360	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
540	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
720	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
900	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
1080	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
1260	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
1440	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
1620	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
1800	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
2160	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
2520	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2
2880	93.3	91.2	86.2	112.2	93.2	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2	97.5	1.2	87.2	1.2	97.5	1.2

Discusión VIII.2.2.2.1. (cont.)

(F) (G) (H) e (I) Parámetros: RMF, RMC, Porosidad, Vu,  $SO_4^{=}$  lcp y derivados correspondientes, véase Tablas 35, 36, 37, 38, 39, 40, 28, 29, 30.

Véase el apartado VIII.2.2.2.2. venidero, correspondiente al estudio comparativo de las puzolanas D y N a través del método de ensayo ASTM C 452, donde figura el estudio global y comparado de los valores de estos parámetros citados, correspondientes a las mismas.

Interpretación VIII.2.2.2.1 (E)

De la discusión 1ª y 7ª: Aquí cabe una interpretación similar a la dada para idéntica familia P-1/D 80/20, 70/30 y 60/40 cuando se ensayó según el método L-A, pues en sus tortas correspondientes los geles  $CSH_{SiO_2}^r$  de la puzolana D ven incrementada lógicamente su propia acción protectora:

1ª.- Vale aquí íntegramente las razones dadas en las interpretaciones VIII.1.2.2.1.(E), 1ª y 5ª (L-A).

2ª.- Porque a igualdad de cemento de mezcla, al ser la porosidad de la pasta de las tortas L-A muchísimo menor que la del mortero de las probetas ASTM C 452 respectivas, el proceso de hidratación selenitosa deberá producirse mas rápidamente en estas últimas que en aquellas, y los resultados finales correspondientes también, como ha sido el caso, (facilitado todo ello por la mayor porosidad originada en las probetas en el caso de que su relación  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$  y no  $\frac{a}{c} = c = \text{cte.} = 0,485$ ), véase Fotos 1 y 5, en las que se puede observar claramente como las probetas del mortero con  $\frac{a}{c} = d$  de los cementos de mezcla P-1/D 80/20, se han curvado a la edad de 90 días, mientras que a su torta L-A correspondiente, le ocurre otro tanto 455 días después. Y a las homónimas azasadas con  $(a/c)=c$  les ocurre otro tanto en valor absoluto aunque no lo suficiente como para llegar a curvarse según las razones que se dan al efecto mas adelante.

No obstante en esta comparación de métodos de ensayo L-A y ASTM C 452, interesa tanto lo que ocurra finalmente en ambos (concordancia en el diagnóstico como ha sido el caso), como lo que ocurre al principio, desde el instante mismo de comenzar su propio ataque sulfático agresivo respectivo, pues conocidos ambos, quizás pueda deducirse fácilmente lo que debe de ocurrir en las edades intermedias de los mismos. Así que recordando lo dicho a propósito en la interpretación VIII.1.2.2.1. (L-A), a igualdad de cemento de mezcla e instante inicial anterior al comienzo de la propia hidratación selenitosa tanto de la torta como de sus probetas de mortero homónimas, aquellas

deberán poseer mas geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-1 rios}}$  del curado bajo  $\text{H}_2\text{O}_{14d}$  que las probetas (de la  $\frac{a}{c} = c = 0,485$  ó de la  $\frac{a}{c} = d = 0,60$  a  $1,0$ ), debiéndose aminorar y cambiar incluso de signo tal diferencia inicial entre las mismas con el progreso de la hidratación selenitosa respectiva, ya que ello viene facilitado,

- porque la dificultad al trasiego iónico aumenta con la misma merced al aumento global de aquellos  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$ , con ésta, y

- por la facilidad que supone la razón dada de la mayor porosidad de las probetas del mortero sobre las tortas homónimas con sus consecuencias correspondientes de una mayor y mas rápida hidratación global de aquellas,

con lo cual,

- en las tortas se deberá provocar desde su origen un elevadísimo impedimento al trasiego iónico agresivo y consiguientemente su estabilidad de volumen o constancia relativa de su  $\Delta\bar{L}$ , mientras que,

- en las probetas correspondientes, deberá ocurrir,

. a edades iniciales, todo lo contrario, por el motivo opuesto - carencia casi total de geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-1 rios}}$  -, por lo que en las mismas, y para entonces, la formación correspondiente de  $\text{ett-lf}^{\text{ria}}$  debe ser similar o incluso mayor (por mayor porosidad, derivada de la  $\frac{a}{c} = d$  y del contenido de puzolana D) que la del cemento portland matriz constitutivo P ó PY solo, de lo cual se deduce que aunque la Vf de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  sea superior a la Vf de la  $\text{ett-lf}$ , no deberá serlo lo suficiente como para impedir la formación de esta última, o sea, impedir el aumento de los valores  $\Delta\bar{L}$  de las probetas correspondientes, y

. a edades posteriores y hasta el final del ensayo, lo mismo que en las tortas homónimas,

con lo que las probetas, a edades iniciales y quizás alguna(s) intermedia(s), deberán tener una elongación apreciable, y a las posteriores hasta el final del ensayo, marcada estabilidad de volumen, la cual se alcanzará tanto mas pronto conforme menos  $\text{C}_3\text{A}$  tenga el cemento portland matriz constitutivo, P ó PY, y viceversa; no siendo este el caso en aquellas, las tortas, donde su marcada estabilidad de volumen es prácticamente indiferente del contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  de la torta en cada caso, por las razones aducidas anteriormente.

Por todo lo cual no debe de extrañar lo dicho en la interpretación VIII.1.2.2.1. y es que, mientras en el ensayo L-A, esta puzolana D es capaz de elevar al rango de "elevada RS" a cementos portland de elevado contenido de  $C_3A$ , caso del P-1 (14,11%  $C_3A$ ) y el P-2 (11,09%  $C_3A$ ), sin más que mezclarla adecuadamente, en peso, con cada uno (y mejor aún a los de mediano contenido y bajo contenido, por idéntico motivo) en este, ASTM C 452, no lo es tanto, debiéndose de mezclar en este caso con uno de mediano a bajo contenido de  $C_3A$ , como ha sido el P-5 (6,83%  $C_3A$ ) Únicamente ( $\Delta L_{28d} < 0,054\%$ , en todos los casos), para idéntico fin.

Todo ello se habrá de traducir necesariamente en que, según las características y/o exigencias de la propia obra civil, se podrá hacer, o no, que las condiciones de hormigonado, desencofrado y curado del hormigón (de cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con cemento portland y puzolana silícica), con el que se va a realizar aquella, sean lo mas parecidas posible a las del método de ensayo L-A o a las del método ASTM C 452 según convenga, las cuales figuran en las Aplicaciones XII, 11ª y 12ª (veniceras).

Por otra parte los hechos anteriores citados dan pie a pensar con fundamento que el mecanismo protector de los geles  $CSH_{SiO_2}$ - de la puzolana D no debe ser en exclusiva el de taponamiento de la porosidad total del sistema, merced al mecanismo de through-solution, pues en caso de que fuera tal mecanismo se vería mas favorecido por la mayor porosidad del mortero de las probetas P-1/D 30/20 amasadas con  $\frac{a}{c} = d$ , que la de la pasta de la torta correspondiente, y por tanto en el caso mas favorable de dicho cemento de mezcla PA P-1/D 30/20, sus probetas de mortero se hubiesen curvado después, que no antes, que su torta (L-A) correspondiente, ¡ Y eso no ha ocurrido, sino todo lo contrario !. (Para lo cual además haoríase de admitir que en la probeta la Vf de los geles  $CSH_{SiO_2}$ - habría de ser mayor que la Vf de la ett-1f, lo cual no parece ser el caso segun los resultados experimentales obtenidos).

Del mismo modo tampoco debe de ser en exclusiva el mecanismo de la actuación de los geles a modo de "almohadilla" ante la expansividad de la ett-1f, citado en la interpretación VIII.1.2.2.1 (E), el cual consistiría, en principio -estado de neoformación y gelatinoso por tanto de los geles  $CSH_{SiO_2}$ - en que precisamente merced al estado gelatinoso inicial de los mismo, en cierta medida podrían "acomodar" y frenar por ello mas y mejor en su seno la innata expansividad de aquella, la ett-1f, formada al unísono y mas o menos próxima a aquellos recién formados, amortiguándose de esta manera su nocividad características. No obstante en contra de esta posible hipótesis está,

- la razón dada en la interpretación de la presente discusión y es que si los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  tuvieran al menos de origen ese comportamiento a modo de "almohadillas amortiguadoras" de la expansividad de la ett-lf, todas las tortas del cemento portland matriz P y la puzolana D (ó N) hubieran originado -al menos a las edades iniciales del ensayo y a igualdad de todo lo demás-, igual o similar -por lo escaso-  $\Delta\beta$  e  $\Delta\bar{L}$ , y con mayor razón aún la 80/40 que la 80/20 hermana de cada familia, o al menos que el,

.  $\Delta\beta$  (en el caso de las tortas, L-A) hubiese disminuido con la disminución de puzolana C, puesto que al menor cantidad de puzolana añadida, menor cantidad de geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  originados, mayor cantidad de ett-lf total a formar respectivamente con los mismos, torta 80/20, y menor poder acomodaticio de la misma en aquellos, con lo que la parte de su innata expansividad hubiese originado a las edades iniciales algo de  $\Delta\beta$  en la torta 80/20 y menos aún en la 70/30 y 60/40, por este orden, hermanas de aquella (y para ello todos los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  o la mayor parte han de estar formados antes que aparezca la ettringita lo cual haría que el  $\Delta\bar{L}$  de todas las probetas fuera nulo o casi nulo, lo cual no ha sido el caso sino todo lo contrario), véase Tabla 19; y al

.  $\Delta\bar{L}$  le hubiese ocurrido otro tanto, hecho éste acaecido en el caso de la puzolana D, véase Tabla 41, pero no en el de la N, véase Tabla 32, quizás por mayor adecuación de la constitución físico-química de la N sobre la D para dicho fin, aunque no obstante ambos casos en contra de la aportación a favor de la presente hipótesis. Pues por parte de la puzolana N está su probable mayor contenido de  $\text{H}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  que la D, el cual según las razones correspondientes aducidas en las interpretaciones venideras VIII.2.2.2.2(E)(F), VIII.2.2.2.6 y VIII.3.3.2.1. (G)(H), sería el causante del aumento de  $\Delta\bar{L}$  mostrado por la misma -a edades iniciales especialmente- con el aumento de su presencia, el cual quedaría mas y mejor "almohadillado" -menor  $\Delta\bar{L}$ - con su propia presencia, como ha sido el caso; y por parte de la D están los hechos siguientes:

. que la Vf de los  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  al tener que ser menor que la Vf de la ett-rf y la ett-lf sobre todo para este caso, (al formarse ambos a la par en un medio portlandítico y selenitoso apropiado) y tanto menor cuanto menos reactiva sea la  $\text{SiO}_2$  constitutiva de la puzolana silícica en cuestión, la disminución de  $\Delta\bar{L}$  originada con la adición de puzolana D, deberá estar gobernada por este hecho -menor  $\Delta\bar{L}$  cuanto menor presencia de  $\text{C}_3\text{A}$ - mas que por el de la actuación de los geles a modo de "almohadilla", y

. la razón afín dada al final de la interpretación VIII.2.2.2.2(E) (venidera) y referente a la actuación de los geles a modo de "almohadillas", que implicará formación del total de ett-lf y consumo o fijación de todo el 7,0% de  $\text{SO}_3$  inicial para tal fin, por lo que en los líquidos de conservación de las probetas correspondientes P-1/D 80/20, 70/30 y 60/40 no se deberán detectar iones  $\text{SO}_4^{\text{r-}}$  apenas y en los tres casos por igual, pero ello así no ha ocurrido sino todo lo contrario, véase a propósito dicha interpretación citada y las Tablas 40 y 47; y del mismo modo la porosidad hubiese disminuido notablemente a la par que la Vu hubiese aumentado en el mismo orden; y nada de éso ha ocurrido ! Pues tanto las disminuciones en porosidad como los aumentos en Vu, han sido escasos, véase Tablas 38 y

45, hasta el punto que tales morteros selenitosos de las puzolanas D y N continúan siendo los mas porosos de todos los preparados causa por la cual no son comparables en dichos parámetros, porosidad y Vu, - con el resto, y

- la razón que se da en función de los valores del parámetro PAV, caso de las tortas (L-A), correspondientes, ya que si la hipótesis de la actuación de dichos geles a modo de "almohadillas acomodaticias" fuera en exclusiva, ello debería llevar parejo que al menos durante tales fases de "almohadillamiento" ó "acomodación" de la  $\text{etf-lf}$  expansiva, en el seno de dichos geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  - (formados notablemente a priori, caso del método L-A, o a la vez que la misma -y por tanto en menor cantidad que en el L-A caso de los métodos ASTM C 452 e H-A, respectivamente), la aguja de Vicat debería haber penetrado algo, al menos, en alguna torta; Y ello no ha ocurrido en ninguna torta y ninguna edad de la misma! puesto que el valor del PAV de todas ellas ha sido siempre 0,00 mm de principio a fin del ensayo (e incluso después, doy fé), véase Tabla 19.

De aquí que, según todo ello, y por exclusión, tome mas cuerpo sobre cualquier otra, la hipótesis mas probable como es la de que el mecanismo protector de tales geles tobermorfíticos, sea el de barreras, o compuertas protectoras locales y compartimentales distribuidas, mas o menos uniformemente al azar,

- por toda la masa del sistema, caso de las probetas de mortero ASTM C 452 e H-1, ó

- sólo en la(s) capa(s) superficial(es), de algunos mm. de espesor, y actuando en conjunto a modo de "impermeable", caso de las tortas selenitosas de pasta hidratada del método L-A, véase Fots.1, 2, 3 y 4,

posibilidades éstas ambas que no se contradicen en absoluto puesto que la mayor porosidad "perse" del mortero sobre la torta homónima, las justifica. Y esta posibilidad de actuación de los geles a modo de "impermeable" en el caso de las tortas se ve avalada por el hecho de la propia deformación ocurrida tan sólo en la torta P-1/D 80/20 (la única posible por la razón dada en la interpretación VIII.1.2.2.1 (E)) y a la edad de 545 días, véase Fot.1, pues tal "impermeable" de geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  previamente formados, tan sólo sería "atravesado", en su caso por aquellas zonas del mismo mas en contacto con la disolución sulfática agresiva, lógicamente la base de la torta; de tal modo que una vez "atravesado" y "superado" aquel se formaría de nuevo algo mas internamente, al igual que al principio, y así lenta pero sucesivamente, de tal modo que en conjunto todo ello quizás se pudiera asimilar "al retroceso en combate de la linea defensiva (la capa "impermeable" de geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$ ) ante el empuje lento y progresivo del enemigo", en este caso el ión sulfato agresivo, de aquí la forma tan peculiar o "estado de levitación" adquirido por dicha torta P-1/D 80/20, véase Fot. 2. Pese a lo cual y según tal simil "bélico" también cabría la posibilidad de que tal avance pudiera realizarse, comparativamente, con mayor rapidez y violencia "explosiva" siempre y cuando no hubiera  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  suficiente para así impedirlo.

No obstante y en cualquier caso sea cual fuere el mecanismo protector de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de la puzolana D (y N) ante el ataque de los iones sulfato, lo único verdaderamente cierto es que los mismos deben dificultar

el trasiego iónico necesario y suficiente para impedir-dificultar mas o menos en todos los casos la formación de la etf-lf expansiva (y ello tanto mas cuanto mas y mejor se hayan podido formar antes de la llegada del citado ataque agresivo sulfático) la cual se formaría con la relativa gran rapidez que se suele formar en ausencia de aquellos, debiendo depender el grado de dificultad interpuesto de la calidad de los mismos, es decir, de su menor relación C/S; por ello las probetas correspondientes a los cementos de mezcla hermanos P-1/D 70/30 y P-1/D 60/40, se han curvado cada vez menos por su mayor contenido de puzolana D, es decir, por su mayor contenido de  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  y menor correspondiente de reserva portlandítica de origen fracción P-1 acompañante. Y como confirmación de ello están los hechos siguientes,

- que el valor máximo de la Vcl de las probetas P-1/D 80/20, se alcanza 73 días después que el correspondiente valor máximo de su cemento portland matriz P-1 sólo, con lo que se demuestra una vez mas que la Vf de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  con  $\frac{a}{c} = d$  debe interferirse con la Vf de la etf-lf hasta anularla ya que si así no fuera, porque la puzolana D actuase como inerte  $\text{RS}$ , debería haber ocurrido lo contrario, es decir, alcanzar el valor máximo de Vcl a la edad de 14 días ó incluso antes, y no a la edad de 30 días como ha sido el caso, aunque hay que decir también que no lo suficiente como para impedir su práctica formación.
- que la ausencia de curvatura en el caso de las probetas homónimas amasadas con  $\frac{a}{c} = c$ , ver Fot. 5, ha de estar muy relacionada con su menor cantidad de agua de amasado, la cual de este modo podrá ser presumiblemente a igualdad de instante inicial del amasado, enmoldado, conservación en C.H. y desenmoldado, mas básica por mas concentrada, gracias a lo cual la formación de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de la puzolana D se puede llevar a cabo mejor y mas rápidamente en este caso  $\frac{a}{c} = c$  que en aquél  $\frac{a}{c} = d$ ; y como prueba de ello está el hecho de que los valores de las RMF y RMC de las probetas respectivas, a igualdad de edad inicial del ensayo y a mas inicial mejor, han resultado ser notablemente diferentes pero en favor de los primeros, o sea, de los de  $\frac{a}{c} = c$ , véase Tabla 35, señal inequívoca de la mayor participación por mayor presencia de los mismos, o sea de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  <sup>rios</sup> de origen esta última relación citada  $\frac{a}{c} = c$ , que los de aquél ó  $\frac{a}{c} = d$  (debiendo de ocurrir todo lo contrario a edades intermedias y finales, por mayor participación para entonces en aquellas, de los  $\text{C}_x\text{S}$  y  $\text{H}_2$  correspondientes, como así ha ocurrido en este trabajo, donde en general y a igualdad de todo lo demás los valores de las RMF y RMC con  $\frac{a}{c} = d$  llegan a superar tarde o temprano en todos los

casos a los correspondientes a la  $\frac{a}{c} = c$ ; todo ello deberá dar por consecuencia adicional que a igualdad de todo lo demás la porosidad de las probetas de esta última agua de amasado  $d$ , deberá ser mayor que la de aquellas, o agua de amasado  $c$ , ocurriéndole todo lo contrario a la Vu, como así ha ocurrido en este trabajo, véase Tablas 38 y 39.

Por otra parte y mediante este ensayo ASTM C 452 también se constata lo que en aquél L-A, es decir, que a cada cantidad de ettringita por formar en cada caso, le debe corresponder un gel  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$ , de relación determinada; de aquí que a los cementos de mezcla P-1/D 60/40 y toda la familia P-2/D les haya ocurrido otro tanto como en sus tortas L-A correspondientes, es decir, su no curvamiento o resquebrajamiento respectivos, no así el cemento de mezcla P-1/D 70/30, que en probeta de mortero si se ha curvado a las edad de 120 días (menos que su hermano 80/20) y en torta no, por la razón apuntada al inicio de esta interpretación, pues en este último caso, torta, y según la razón apuntada anteriormente, su menor porosidad coadyuva a que el gel tobermorítico pueda ser y/a lo suficiente protector, aunque "per se" no le fuese, como lo demuestra su probeta de mortero correspondiente.

Y en cuanto a lo ocurrido con los valores del parámetro derivado  $V_{cl}$ , se puede decir que, probablemente ello se deba a que por lo general durante los primeros seis días de edad de las probetas, se debe de producir la mayor parte de la hidratación selenitosa de la fracción cementante del mortero y con ella del  $\text{C}_3\text{A}$  correspondiente en cada caso. No obstante no debe de olvidarse que el resto de la misma también se debe de hidratar, ya sea de origen cemento portland matriz acompañante correspondiente P ó PY, ó de origen puzolana D, la cual a igualdad de cemento de mezcla, es constante, debiéndose originar la ett-lf comparativamente y en determinados casos (probetas de los cementos de mezcla 80/20 de cemento matriz acompañante P-1 con 14,11%  $\text{C}_3\text{A}$ ), en menor cantidad que la que debiera por menor porosidad de las probetas, ver valores Tabla 38, con lo cual la  $V_{cl}$  no deberá de minimizarse de origen tan rápidamente sino en todo caso, pasados algunos días—28 en este caso—, y si deberá minimizarse más rápidamente y por todo lo contrario en el caso de las probetas hermanos 60/40, como así ha ocurrido en este trabajo.

No obstante y teniendo en cuenta todo lo anterior al respecto, si la  $V_f$  de los  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  obtenidos con  $\frac{a}{c} = d$ , hace que la  $V_f$  de la ett-lf, se anule, y si la  $V_f$  de los  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  obtenidos con  $\frac{a}{c} = d$ , es  $< V_f$  de los  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de  $\frac{a}{c} = c$ , por la propiedad transitiva, la  $V_f$  de los  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  obtenidos con  $\frac{a}{c} = c$ , hará que la  $V_f$  de la ett-lf se anule antes;



consiguientemente se deberá frenar mas en este caso el crecimiento de las probetas correspondientes, o sea, de  $\frac{a}{c} = c$ , por mayor presencia ("cantidad" y "calidad"), quizás, de los geles de tal origen,  $\frac{a}{c} = c$ , -a igualdad de edad sobre todo inicial del ensayo-, en las mismas; con lo que deberán expandir menos pudiendo llegar incluso a no curvarse, que es lo ocurrido en este trabajo, véase Fot.5. Y todo ello a diferencia de lo que podría originarse por el motivo contrario, como así ha ocurrido tambien en este trabajo en las probetas homónimas preparadas con  $\frac{a}{c} = d$ , véase Fot. 5.

Por lo tanto y según todo ello, se puede decir con fundamento que en la mayoría de las probetas preparadas con esta puzolana D, bien con  $\frac{a}{c} = c$  ó con  $\frac{a}{c} = d$ , la mayor parte de las reacciones puzolánicas derivadas de la misma, han de transcurrir durante los primeros 28 días de ensayo, ya fuere el agua de amasado de las probetas la  $c$  ó la  $d$ , (aunque a favor de la  $c$ ), con las únicas excepciones, en esta última agua de amasado  $d$ , de las probetas de los cementos de mezcla P-1/D 80/20 y P-1/D 70/30, en las que tales reacciones puzolánicas deben de transcurrir durante los 90 días del mismo. De aquí que en el primer caso- que son casi todas las probetas-, se pueda proponer, por dicho motivo, y aceptar, en principio, la fecha de 28 días de edad de las mismas, como tope mínimo necesario y suficiente para poder juzgar como de "elevada, o no, RS" a sus cementos de mezcla constitutivos, preparados con esta puzolana D, mediante el valor del  $\bar{\Delta L}$  de aquellos a tal edad. Y del mismo modo, dicha edad citada de 28 días, puede ser igualmente válida para las probetas de los dos cementos de mezcla P-1/D 80/20 y P-1/D 70/30 amasados con  $\frac{a}{c} = d$ , que constituyen la excepción de este caso, puesto que si para su cemento portland matriz constitutivo, P-1 (14,11%  $C_3A$ ) sólo , e igualmente para el P-2 (11,09%  $C_3A$ ), ensayados de igual modo, se acepta el valor del  $\bar{\Delta L}$  a la edad de 14 días de sus probetas, para la calificación correspondiente de los mismos, pese a no haber alcanzado ambas unicamente para entonces la mayoría absoluta en su Vcl de entre todos los casos planteados afines, 6 P y 6 PY, con mayor razón se podrá aceptar la de 28 días para los cementos de mezcla citados P-1/D 80/20 y P-1/D 70/30 respectivamente a la edad de 28 días de ambos.

Y todo ésto sin olvidar que muy probablemente la actividad de cualquier kieselgur natural debe de ser lógicamente mayor que la de esta puzolana D al no haber sufrido aquél, a diferencia de ésta,

tratamiento térmico alguno que le menoscabe tal característica. De aquí que tales reacciones puzolánicas correspondientes deban transcurrir con mas razón aún, durante los primeros 28 días del ensayo, como ha ocurrido en este trabajo con la N en el ensayo de Fratini y en el ASTM C 452 que se verá seguidamente (además de en el H-1).

Finalmente y en cuanto al corto periodo de tiempo, 90 días, en que ha aparecido una mayor curvatura en las probetas de los cementos de mezcla P-1/D 80/20 y 70/30 principalmente, en relación con la de su cemento portland matriz constitutivo P-1 solo, cabe decir lo correspondiente a la interpretación VIII.1.2.2.1., 3ª (L-A). Y además que ello lógicamente ha de deberse a la mayor cantidad de agua de amasado empleada en tales casos que con el P-1 sólo (0,66 y 0,75 - contra 0,51 respectivamente), la cual haría que nada más amasadas, las primeras creen porosidad en la propia pasta cementante de su fracción P-1 constitutiva, que junto con

- la propia fracción diatomea que la acompaña,
- el aprisionamiento inicial intraporos diversos - especialmente del interior de la diatomea - de agua de amasado, y
- la mayor hidratación selenitosa ulterior, tanto endógena - agua intraporos - como exógena - agua de curado - de todo el conjunto,

nos llevaría a que las más porosas, hidratadas y curvadas de todas las probetas deberían haber sido las del cemento de mezcla 60/40 y no las de su hermano mayor 80/20; pero no se ha de olvidar que en las de este último la cantidad de geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  totales a formar deberá ser menor que en las de aquél y al contrario de ett-1f por mayor-menor presencia de  $\text{C}_3\text{A}$ , respectivamente, en los mismos. De aquí que según lo ocurrido en

este trabajo, el cociente  $\frac{\text{ett-1f.T}}{\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-T}}}$  o su inverso, según las interpre-

taciones anteriores, deberá ser en los de 60/40 mas idóneo ó favorable que en los del 80/20 y consiguientemente menos expansoras, pese a mas porosas, véase Tablas 32, 38 y Fot. 5.

De las discusiones 2ª, 3ª, 4ª, y 5ª: Se le ha llamado efecto de un "inerte<sub>RS</sub> aparente", porque si así no fuera, y si "inerte<sub>RS</sub> real", a igualdad de edad, los  $\bar{\Delta}L$  de las probetas de sus cementos de mezcla correspondientes 80/20, 70/30 y 60/40, deberían de ser en TODOS los casos un 80%, 70% y 60%, respectivamente, de los  $\bar{\Delta}L$  de las probetas de su cemento portland matriz constitutivo, P ó PY, solo, y no menores que tales porcentajes respectivos, como así

ha ocurrido en la casi totalidad de los cementos de mezcla (167 de un total de 168) y durante todo el ensayo, menos en el P-1/D 80/20 con  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$ , en el que la puzolana D actuó como tal, sólo hasta la edad de 60 días y el resto hasta el final del ensayo aproximándose en esta ocasión por lo tanto a un interte<sub>RS</sub> real, lo cual no menoscaba en absoluto para que la actuación global de la misma se puede definir en su conjunto como la de un "inerte<sub>RS</sub> aparente", véase Tabla 33,

Tabla 33

Edad días	Cemento de Mezcla											
	AL 10/90				AL 10/90				AL 10/90			
	AL 10/90				AL 10/90				AL 10/90			
	AL 10/90	AL 10/90	AL 10/90	AL 10/90	AL 10/90	AL 10/90	AL 10/90	AL 10/90	AL 10/90	AL 10/90	AL 10/90	AL 10/90
7	0,094	0,075	0,055	0,032	0,075	0,057	0,034	0,058	0,051	0,031	0,011	0,001
14	0,176	0,141	0,112	0,074	0,112	0,097	0,064	0,106	0,087	0,061	0,031	0,001
21	0,277	0,222	0,165	0,101	0,194	0,132	0,099	0,166	0,128	0,095	0,055	0,015
28	0,474	0,376	0,281	0,199	0,332	0,275	0,211	0,294	0,239	0,185	0,115	0,045
42	0,950	0,768	0,572	0,387	0,672	0,522	0,338	0,676	0,531	0,333	0,183	0,083
90	0,959	0,767	0,545	0,380	0,672	0,541	0,341	0,675	0,539	0,335	0,185	0,085
120	0,961	0,769	0,545	0,380	0,673	0,541	0,341	0,677	0,539	0,335	0,185	0,085
150	0,962	0,770	0,545	0,380	0,673	0,541	0,341	0,677	0,539	0,335	0,185	0,085
180	0,962	0,770	0,545	0,380	0,673	0,541	0,341	0,677	0,539	0,335	0,185	0,085
210	0,963	0,770	0,545	0,380	0,673	0,541	0,341	0,677	0,539	0,335	0,185	0,085
255	0,965	0,772	0,545	0,380	0,673	0,541	0,341	0,677	0,539	0,335	0,185	0,085
345	0,965	0,773	0,545	0,380	0,673	0,541	0,341	0,677	0,539	0,335	0,185	0,085
420	0,964	0,773	0,545	0,380	0,673	0,541	0,341	0,677	0,539	0,335	0,185	0,085

No obstante se ha de reconocer que esta hipótesis se cumple con mayor claridad tanto en el caso de la puzolana N igualmente ensayada, como con ésta, la D, cuando se ensayó a través del método de ensayo de L-A, por las razones afines dadas anteriormente referentes al mayor contenido probable de geles  $\text{CSH}^{\text{r-}}$ , respectivamente, en ambos casos, aunque por distintas razones (\*véase la pag. 380)

Únicamente queda por reseñar aquí que las interpretaciones VIII.1.2.2.1. (E), 1ª, 2ª y 3ª (L-A), son aplicables a este caso con las diferencias lógicas derivadas de ambas técnicas operatorias respectivas, L-A y ASTM C 452, distintas.

De la discusión 6ª, 7ª y 8ª: Ello bien pudiera deberse a la última razón apuntada de la interpretación anterior es decir a la mayor disponibilidad de portlandita, con sus probables consecuencias, expansoras entre otras, de los cementos de mezcla del PY-4 ó PY-6 sobre los del resto, en especial, de los P.

De la discusión 9ª: Ello probablemente se deba, además de la razón apuntada al efecto en la interpretación 1ª, a que con el agua de amasado  $c$  sólo existe la suficiente para fraguar la probeta, mas con geles  $CSH_{SiO_2}$  de la puzolana D que con la hidratación de su fracción cemento matriz P acompañante correspondiente. Y una vez formados rápidamente aquellos, impedirían la posterior hidratación del resto, posible y mayormente anhidro, de su fracción portland matriz P anterior; debiendo ocurrir todo lo contrario en el caso del agua de amasado  $d$ . Este hecho, mayor cantidad de agua de amasado,  $d$ , véase Tabla 34, ha podido ser la causa por la que las probetas P-1/N 80/20 y 70/30 con  $\frac{a}{c} = d$  no se han curvado y las P-1/D 80/20 y 70/30 en cambio, si, pues a igualdad de cemento de mezcla el valor  $d$  de las N ha resultado ser igual o menor que el correspondiente a las D, junto con la posible mayor reactividad de la  $SiO_2$  (y  $Al_2O_3^F$ ) de la primera, N, sobre la segunda, D, véase Fig. 4.

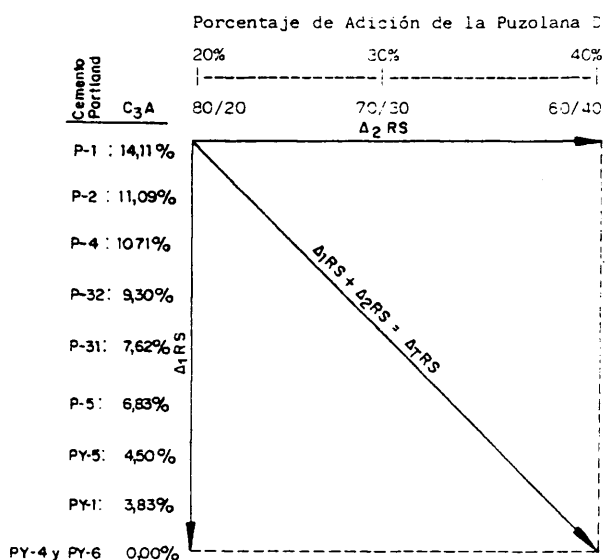
De la discusión 10ª: Ello probablemente se deba:

- a) A la propiedad adsorbente tan característica que poseen este tipo de puzolanas por tratarse de caparazones o estuches vacíos, y,
- b) Al efecto químico derivado de la rehidratación de la sílice amorfa aún anhidra que las constituye, pues en su fórmula  $SiO_2 \cdot nH_2O$  el valor de  $n$  es variable en función del medio mas o menos acuoso en el que se encuentren.

Finalmente, del compendio global de toda esta interpretación, se comprende facilmente como, a igualdad de edad, cemento de mezcla y agua de amasado  $c$ , mejor que la  $d$  aún, las probetas de cualquier cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con esta puzolana D han mostrado, por lo general, un  $\bar{\Delta L}$  menor que las de su cemento portland matriz constitutivo solo, aumentando la diferencia entre ambos valores de  $\bar{\Delta L}$  homónimos (aumento de RS), con el aumento del contenido de  $C_3A$  de éste P, y la adición de aquella, D, y viceversa.

Por otra parte y de igual modo se comprende también como la mejora o aumento de la RS provocada por la presencia de esta puzolana silícica D en todos los casos planteados, sigue cualitativamente

el sentido de la resultante de los dos vectores siguientes:



de donde se deduce que con la misma, D, en unos casos se conseguirán cementos de elevada RS, en otros simplemente de mediana o moderada RS, y en otros de baja RS, pero en cualquier caso siempre superior a la de su cemento portland matriz constitutivo solo, como así ha ocurrido en este trabajo.

#### VIII.2.2.2.2.- Cementos de Mezcla preparados con la Puzolana N.

##### VIII.2.2.2.2.1.- Estudio Individualizado de la Puzolana N.

##### Discusión VIII.2.2.2.2.1

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$ , véase Tablas 41 y 26.

1º.- Sea cual fuere el cemento de mezcla PA y/o PUZ de que se trate, la evolución del  $\bar{\Delta L}$  de sus probetas respectivas, es de aumento gradativo conforme transcurre el ensayo, pero siendo mayor a las edades iniciales que a las finales del mismo, y distinto de un cemento de mezcla a otro, aún dentro de una misma familia.

Y respecto al parámetro derivado  $V_{cl}$ , se puede decir que ocurre todo lo contrario, principalmente, en lo que se refiere a la primera parte y fundamental de esta discusión, alcanzándose

en cualquier caso el máximo valor del mismo en los primeros 28 días de edad del ensayo y mas concretamente en los primeros 7 días.

24.- Continuando con la discusión anterior, se puede decir que, en general, la relación entre los valores de  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  originados y la cantidad de puzolana N añadida en cada caso es diferente, según posea, ó no,  $C_3A$ , el cemento portland matriz correspondiente de cada familia de cementos de mezcla PA y PUZ, de tal modo y manera que,

- si el mismo posee  $C_3A$ , caso del P-1, P-2, P-32, P-5 y PY-1, y hasta la edad de 28 días, el  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  aumenta en todas las familias con la cantidad de puzolana N añadida, no llegando a superar a los correspondientes de su cemento portland matriz respectivo solo , cuanto mayor ha sido el contenido de  $C_3A$  del mismo, y viceversa en contadas ocasiones (7 de un total de 120 determinaciones por parámetro), es decir,

$\bar{\Delta L}$ $V_{cl}$	P ó PY-nº con $C_3A/N$ ; 80/20 < 70/30 < 60/40 < 100/00	h.28d.
------------------------------	---	--------

por lo tanto se puede decir con fundamento que hasta dicha edad de 28 días, impera el efecto químico directo de la sustitución física de cemento portland P ó PY con  $C_3A$ , por la puzolana N; el cual a lo largo del ensayo tórnase poco a poco en todo lo contrario, es decir que impera el efecto químico inverso de la sustitución física, cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz correspondiente, y viceversa, sin llegar a superar en ningún caso, a los correspondientes  $\bar{\Delta L}$  de aquél, y tanto mas es así cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del mismo; es decir, ocurre en el fondo, que no en la forma, un fenómeno análogo al de la puzolana D en iguales condiciones, pero mas acusado aún

$\bar{\Delta L}$ $V_{cl}$	P-1, P-2 ó P-31/N; 100/00 > 80/20 > 70/30 > 60/40	d.28 a 730 d.
------------------------------	---	------------------

$\bar{\Delta L}$ $V_{cl}$	P-5 ó PY-1/N; 80/20 < 70/30 < 60/40 < 100/00	d.28 a 730 d.
------------------------------	--	------------------

- y si el mismo no posee  $C_3A$ , caso del PY-4 y el PY-6, se verifica durante todo el ensayo la primera parte de la generalidad anterior es decir, impera el efecto químico directo de la sustitución física, siendo tan solo 38 valores de un total de 134 distintos y 22 iguales obtenidos, del  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$  de las probetas del cemento matriz acompañante respectivo solo mayores que las correspondientes de aquellos.

3ª.- Por lo general, a igualdad de edad y cemento de mezcla PA ó PUZ, y durante todo el ensayo, el  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$  de sus probetas respectivas disminuye proporcionalmente con el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz acompañante correspondiente P,

	P-1/N 80/20 > P-2/N 80/20 > P-32/N 80/20 > P-5/N 80/20	
> $\bar{\Delta}L$ >	P-1/N 70/30 > P-2/N 70/30 > P-32/N 70/30 > P-5/N 70/30	p.f.e.
	P-1/N 60/40 > P-2/N 60/40 > P-32/N 60/40 > P-5/N 60/40	
	14,11% $C_3A$ > 11,09% $C_3A$ > 9,30% $C_3A$ > 6,83% $C_3A$	

e igualmente ocurre entre los de matriz PY, es decir,

	PY-1/N 80/20 > PY-4 ó PY-6/N 80/20	
> $\bar{\Delta}L$ >	PY-1/N 70/30 > PY-4 ó PY-6/N 70/30	p.f.e.
	PY-1/N 60/40 > PY-4 ó PY-6/N 60/40	
	3,83% de $C_3A$ > 0,00% de $C_3A$	

habiéndose de destacar como excepción en el caso de las familias de cementos de mezcla PA y PUZ de cemento portland matriz acompañante P-5 y PY-1 respectivamente, ambos "frontera" posterior y anterior del valor 5,0% de  $C_3A$  entre los que ocurre todo lo contrario a la generalidad citada.

Y en el caso particular de las familias de cementos de mezcla PA y PUZ de cemento matriz acompañante PY-4 y PY-6 respectivamente ocurre que a igualdad de edad, cemento de mezcla y durante todo el ensayo,

	PY-4/N 80/20 < PY-6/N 80/20	
< $\bar{\Delta}L$ <	PY-4/N 70/30 < PY-6/N 70/30	p.f.e.
	PY-4/N 60/40 < PY-6/N 60/40	

4\*.- Vale aquí íntegramente la discusión VIII.2.2.2.1. (E), 4\* de la puzolana D igualmente ensayada.

5\*.- Las consecuencias de las discusiones anteriores se materializan de un modo interesante en los cementos P-5, PY-5 y PY-1, "frontera" anterior y posteriores, respectivamente, del valor 5% de  $C_3A$  que les separa a los portland en dos tipologías distintas, los de elevada, ó no, resistencia al ataque de los iones sulfato. De aquí que los resultados experimentales obtenidos confirman que el cemento portland P-5, con un contenido de  $C_3A$  del 6,83% (de "no elevada resistencia al ataque de los iones sulfato", según la norma ASTM C 150-84 y RC-75), al añadirle simplemente un 20%, un 30% ó un 40%, en peso, de esta puzolana N, originan unos cementos de mezcla PA, tales como el P-5/N 80/20, y PUZ, P-5/N 70/30 y P-5/N 60/40, que a igualdad de edad y durante todo el ensayo proporcionan unos  $\bar{\Delta}L$  en sus probetas respectivas menores que los del cemento PY-1 solo con 3,83% de  $C_3A$  (cemento siguiente al PY-5, con 4,50 de  $C_3A$ , en la escala descendente de contenido de  $C_3A$ ), es decir,

$>\bar{\Delta}L>$	PY-1 > P-5/N 80/20 y/ó 70/30 y/ó 60/40	p.f.e.
-------------------	--	--------

6\*.- Vale íntegramente la discusión VIII.2.2.2.1 (E), 8\* de la puzolana D igualmente ensayada, excepto dos mediciones a la edad - de 7 días.

7\*.- Vale aquí íntegramente la discusión VIII.2.2.2.1(nºD) (E) de la puzolana D igualmente ensayada, sólo que en este caso el reparto calificadorio de los cementos de mezcla ha sido como sigue:

De los 42 cementos de mezcla PA y PUZ preparados con la puzolana silícica N, y así ensayados,

- 21 (50,00%), han resultado ser de elevada RS puesto que el  $\bar{\Delta}L_{28d} \leq 0,054\%$ , según la Taola 3ly la parte final de la interpretación VIII.2.2.1,
- 7 (16,67%), han resultado ser de moderada RS, puesto que  $0,054\% \leq \bar{\Delta}L_{28d} \leq 0,073\%$ , según las referencias anteriores, y
- 14 (33,33%), han resultado ser de baja o escasa RS, aunque no obstante y al igual que en el caso de la puzolana D, siempre apreciablemente superior a la de su cemento portland matriz P constitutivo solo.

8\*.- Vale aquí íntegramente la discusión VIII.2.2.2.1 (E)(F) de la puzolana D igualmente ensayada.



9).- En general, todo lo discutido hasta ahora es totalmente válido para ambos tipos de probetas, las confeccionadas con relación  $\frac{a}{c} = a$  y las confeccionadas con relación  $\frac{a}{c} = c$ . No obstante de los 21 cementos de mezcla preparados con la puzolana N y así ensayados, amasados con relación  $\frac{a}{c} = a$  originaron unos valores de  $\Delta L$  en sus probetas respectivas mayores que con  $\frac{a}{c} = c$ .

#### Discusión VIII.2.2.2.1 (cont.)

(F)(G)(H) e (I) Parámetros: RMF, RMC, Porosidad, Vu, y  $SO_{41cp}^{=}$ , y derivados correspondientes, véase Tablas 42, 43, 44, 45, 46, 47, 28, 29 y 30.

Véase el apartado VIII.2.2.2.2. venidero, correspondiente al estudio comparativo de las puzolanas D y N a través del método de ensayo ASTM C 452, donde figura el estudio global y comparado de los valores de estos parámetros citados correspondientes a las mismas.

#### Interpretación VIII.2.2.2.1

De la discusión 1ª: Aquí vale idéntica interpretación dada para el mismo caso correspondiente a la puzolana referencial silícica D, con las lógicas matizaciones y ligeras diferencias entrambos dada su no muy diferente constitución fisicoquímica, véase Tabla 11 y Figs. 6, 7, 8 y 9.

De la discusión 2ª: Probablemente todo ello se deba a que la puzolana N, aunque poca o muy poca, debe de contener algo de  $Al_2O_3^{r-}$  del tipo de la puzolana M y similares, por ello a las primeras edades a mas puzolana N añadida, mas  $Al_2O_3^{r-}$  aportada al cemento de mezcla correspondiente, mayor etf- $r_f$  producida y mayor  $\Delta L$  originado, pero todo ello en escasa medida por el escaso contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  que debe contener la misma. De aquí que en todos los caso, deba sobrar  $SO_3$  del 7,0% inicial aportado como agresivo, para a continuación poder seguir formando el resto de etf- $lf$  que aún quede por formar, generalmente la mayor parte del total posible, por lo que a edades posteriores y en su caso, presencia de  $C_3A$  suficiente para ello, deberá de aumentar el  $\Delta L$  originado en las probetas respectivas con la cantidad de  $C_3A$  del cemento matriz P constitutiva de cada cemento de mezcla de cada familia; o lo que es lo mismo aumentar con la disminución de puzolana N añadida a cada uno de ellos, como así ha ocurrido en este trabajo. Y en caso contrario, es decir, el de ausencia prácticamente total de  $C_3A$ , porque el cemento portland matriz acompañante correspondiente no lo posea, continuar como al principio y durante todo el ensayo, como así también ha ocurrido en este trabajo, caso de las familias del PY-4 y PY-6 especialmente.

Finalmente y respecto a la presente discusión, no quisiéramos dejar de pasar por alto del hecho discutido e interpretado, el que la Vf de la ett-rf de origen el escaso pero claro contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la puzolana N, ha de ser mayor que la Vf de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de la misma.

Por ello en el instante mismo de iniciarse el ataque selenitoso, en este método de ensayo ASTM C 452, la acción protectora de aquellos ante dicho ataque tan severo no puede existir por no estar formados aún para entonces -hecho éste que se palía en el método L-A por todo lo contrario-, con lo que las consecuencias del mismo, mayor  $\Delta L$  originado a mayor puzolana N añadida, se pueden manifestar con toda impunidad, como así ha ocurrido en este trabajo.

Por todo ello la calificación y cualificación de este tipo tan específico de puzolanas debe resultar mas clara y rápida mediante el método L-A que mediante el método ASTM C 452, como así también ha ocurrido en este trabajo. No obstante mediante este último puede resultar igualmente clara, si se prolonga el ensayo en cuestión por mas de 28 días, generalmente hasta los 60, 90 ó 180 días de edad de las probetas.

De la discusión 3ª: Este caso es una consecuencia directa de la segunda parte o fase de la discusión anterior, pues a mas  $\text{C}_3\text{A}$  presente a igualdad de cemento de mezcla, mayor ett-lf se podrá formar en la segunda fase expansora de las probetas respectivas a que dicha ett-lf da lugar. Y la excepción habida a igualdad de cemento de mezcla entre las familias de cemento matriz acompañante P-5 y PY-1 respectivamente, obedece a causas desconocidas pero que en absoluto menoscaban la interpretación dada de la generalidad anterior. Por el contrario y en el caso de las familias de cementos de mezcla PA y FUC de cemento portland matriz PY-4 y PY-6 respectivamente ambos de contenido prácticamente nulo de  $\text{C}_3\text{A}$ , las diferencias habidas entre las mismas a igualdad de cemento de mezcla, ha de ser forzosamente imputable a las diferencias notables en su contenido de  $\text{C}_3\text{S}$ , 58,19% para el primero y 79,43% para el segundo, como ya se dijera en las interpretaciones 7ª y 9ª dadas para idéntico caso con la puzolana D.

De la discusión 4ª y 5ª: Ello es la confirmación de las interpretaciones dadas para idéntico caso cuando se empleó y ensayó la puzolana D mediante el método L-A y el método ASTM C 452, según el cual, este tipo de puzolana D y similares -como es, a tenor de los resultados obtenidos, esta N-, así ensayada, actúan como un "inerte<sub>RS</sub> aparente" y no inerte<sub>RS</sub> a secas, dado que a igualdad de cemento de mezcla el

TABLA 79

COMPARACION DE LOS METALES ACERADOS DE ENSAYO L-16, ASTM C 452-68 E HIERRO-1

ENSAJO	CONCRETO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO	ACERO
--------	----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

VIII.2.2.2.2.- Estudio Comparativo de la Puzolana N con la Referencial Silférica D.

Discusión VIII.2.2.2.2.

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$ , véase Tablas 32, 40 y 26.

1ª.- En este apartado se han de tener en cuenta conjuntamente las discusiones individuales respectivas habidas anteriores de ambas puzolanas D y N, correspondientes a los parámetros  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$ , y en especial aquellas que hacen referencia a la evolución de los valores de los mismos, a lo largo del ensayo, de cada una de ellas.

2ª.- Como se puede observar, el comportamiento de ambas puzolanas, dentro de lo común, disminución notable del  $\bar{\Delta}L$  de las probetas del cemento portland solo con el que se mezclen, tiene apreciables diferencias según sea elevado, mediano ó nulo teóricamente el contenido de  $C_3A$  del mismo. Así se tiene que:

2ª.1.- Caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente haya sido un P de elevado contenido de  $C_3A$ , mas del 8%, como es el P-1 y P-2 respectivamente: Se cumple por lo general que a igualdad de edad, cemento de mezcla y forma de obtención del agua de amasado, el  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$  de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con la puzolana N es menor que el correspondiente a las probetas homónimas preparadas con la puzolana D, confirmándose esta generalidad mas aún,  
- con el contenido de  $C_3A$  del cemento matriz acompañante correspondiente,  
- con la disminución de puzolana añadida, y  
- con la edad del ensayo,  
y viceversa.

2ª.2.- Caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente haya sido,  
- un P de mediano contenido de  $C_3A$ , del 5% al 8%, como es el P-31 y el P-5, ó  
- un PY con  $C_3A$ , como es el PY-1:

Se cumple por lo general que,

- hasta la edad de ensayo de 28 ó 60 días, ó posterior

según casos, el  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$  de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con la puzolana N es mayor que el correspondiente a las probetas homónimas preparadas con la puzolana D,

- desde la edad correspondiente anterior hasta final del ensayo, se cumple todo lo contrario.

2<sup>4.3</sup>.- Caso de que el cemento portland matriz acompañante correspondiente haya sido un PY de contenido teórico nulo de  $C_3A$ , como es el PY-4 y PY-6 respectivamente: Se cumple por lo general que a igualdad de edad, cemento de mezcla y forma de obtención del agua de amasado, el  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$  de las probetas de los cementos de mezcla preparados con la puzolana N es mayor que el correspondiente a las probetas homónimas preparadas con la puzolana D, confirmándose esta generalidad más aún con la adición de puzolana y viceversa.

3<sup>o</sup>.- Vale aquí integrante la discusión VIII.2.2.2.1, 2<sup>o</sup> de la puzolana D, así como su interpretación correspondiente.

4<sup>o</sup>.- De los valores correspondientes al parámetro  $Vcl$  se puede decir otro tanto de lo dicho para el parámetro  $\bar{\Delta}L$  en la discusión 2<sup>o</sup>, pero sólo a las primeras edades del ensayo, puesto que a las restantes, los valores del mismo llegan a minimizarse distintamente de tal manera y hasta tal punto que prácticamente resultan indiferenciables y despreciables.

discusión VIII.2.2.2.2. (cont.)

(F) Parámetros:  $RMF$ ,  $RMC$ ,  $\Delta RMF$ ,  $\Delta RMC$   $V_{\Delta RMF}$  y  $V_{\Delta RMC}$ , véase Tablas 34, 35 36, 41, 42 y 43.

1<sup>o</sup>.- Sea cual fuere el cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con cada una de estas puzolanas D ó N, respectivamente, y así ensayadas, la evolución de los valores,

- absolutos de los parámetros  $RMF$  y  $RMC$ ,
- relativos o incrementos porcentuales correspondientes  $\Delta RMF$  e  $\Delta RMC$ , y
- de las velocidades de crecimiento de los mismos  $V_{\Delta RMF}$  y  $V_{\Delta RMC}$  de sus probetas respectivas a lo largo de todo el ensayo, ha sido,
- caso de los primeros, el de aumento generalizado y ligeramente sinuoso, mucho mas notable a las edades iniciales que a las finales

del ensayo, en las que según los casos, se produce en ocasiones una ligera disminución, pero que en cualquier caso es menor que el de su correspondiente cemento matriz acompañante P ó PY sólo, y aún menor a edades iniciales que a las finales del ensayo.

- caso de los segundos, el de aumento generalizado hasta alcanzar un valor máximo tanto mas pronto cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante correspondiente, y viceversa, y
- caso de los terceros, el de disminución rápida, generalizada y sinuosa hasta su práctica nulidad en todos los casos, pero con el hecho notable de que los valores máximos de los mismos se alcanzan en las edades iniciales del ensayo.

Y todo ello al igual que ocurriere en el fondo que no en la forma, con su cemento portland matriz respectivo solo. Por otra parte, estas generalidades se cumplen en las probetas preparadas con ambas aguas de amasado d y c.

2ª.- En general se puede decir, que durante todo el ensayo en casi todas las familias de cementos de mezcla PA y PUZ preparados con cada una de estas puzolanas D ó N y así ensayados, las RMF y RMC respectivas disminuyen con la cantidad de puzolana D añadida siendo por lo común siempre menor, en dicho orden de 80/20 a 60/40, que la correspondiente a su cemento matriz P ó PY correspondiente sólo, es decir,

RMF	P 6 FY-nº/D 6 N	100/GO > 80/2C > 70/30 > 60/40	p.f.e.
> 6 >			
RMC			

cumpliéndose la misma con las dos aguas de amasado empleadas d  
y c , con la única difereencia NOTABLE de que durante las  
edades iniciales y alguna intermedia, los RMF y RMC de las  
probetas amasadas con el agua de amasado "d" han sido menores  
que las de las homónimas preparadas con el agua de amasado "c",  
ocurriendo TODO LO CONTRARIO durante el resto de las edades  
hasta la final del ensayo; y cumpliéndose además y por otra parte  
que a igualdad de edad inicial, cemento de mezcla y forma  
de obtención del agua de amasado, los valores de los RMF y RMC  
de las probetas respectivas han aumentado con el contenido de  
C<sub>2</sub>A de su cemento portland matriz acompañante, es decir,

RMF	P-n <sup>o</sup> (C <sub>3</sub> A <sup>†</sup> ) D ó N 20/20, 70/30 ó 60/40 > PY-n <sup>o</sup> (C <sub>3</sub> A <sup>†</sup> )	p.f.e.
RMC	D ó N 20/20, 70/30 ó 60/40	

Y en cuanto a los parámetros ARMF e ARMC correspondientes, lógicamente ocurren las generalidades contrarias a las dos anteriores en la mayor parte de las edades del ensayo, excepto en las iniciales, cumpliéndose tan sólo las generalidades citadas al principio, 7 ó 14 días para el caso de los parámetros VcARMFy VcARMCa las edades iniciales del ensayo, cuando el cemento matriz acompañante ha sido de elevado contenido de C<sub>3</sub>A, caso del cemento P-1 y del cemento P-2 y mejor aún para el caso de la puzolana N y agua de amasado "c" en cuyo caso generalmente se produce un aumento de los valores de tales parámetros con la cantidad de puzolana N añadida.

- 4.- Por lo general a igualdad de edad, cemento de mezcla y forma de obtención del agua de amasado, los valores de la RMF y la RMC de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con la puzolana N son mayores que los correspondientes a sus homónimas preparadas con la puzolana E, siendo a su vez ambas menores que el correspondiente porcentaje de RMF ó RMC teóricos de su cemento portland matriz P ó PY solo respectivo, es decir,

RMC	P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup> /D 20/20, 70/30 ó 60/40 "d" ó "e" < 30%, 70% ó
RMF	60% de la RMF ó RMC del P ó PY-n <sup>o</sup> sólo

No ocurriendo lo mismo para la puzolana N en el caso de casi todos sus cementos de mezcla PA 20/20 donde ha ocurrido lo contrario.

- 5.- De un total de 1260 determinaciones realizadas de ambos parámetros RMF y RMC,
- en RMF, un 56,82% de las mismas han resultado ser superiores al porcentaje correspondiente de RMF de su cemento portland acompañante respectivo solo, es decir, en el supuesto de que ambas puzolanas D y N únicamente hubiesen actuado como un INERTE desde el punto de vista de RM, ó INERTE<sub>RM</sub>, y
  - en RMC, un 35,56% de las mismas han resultado ser superiores al porcentaje correspondiente al RMC de su cemento portland matriz acompañante respectivo solo.

Y, al parecer, la participación en tales porcentajes anteriores respectivos es función directa,

- del menor contenido posible de puzolana D ó N en el cemento de mezcla,
- del menor contenido posible de  $C_3A$  del cemento portland matriz que las acompañe, y
- de la menor superficie específica posible del mismo.

Discusión VIII.2.2.2.2. (cont.)

(G) Parámetro: Porosidad, véase Tablas, 33, 44 y 28.

1º.- Sea cual fuere el cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con cada una de estas puzolanas D y N respectivamente, la creación, evolución y desarrollo de los valores de este parámetro de sus probetas respectivas, varía a lo largo del ensayo con sinuosidad irregular semejante, de uno a otro cemento de mezcla (y mas aún en la puzolana N que en la D), pero de periodo constantemente variable durante el mismo, y de forma algo similar en el fondo que no en la cuantía y en su evolución, a como ocurriera en sus cementos portland matrices P y PY respectivos solos, resultando que en los cementos de mezcla PA y PUZ de puzolana D y

- $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$ ,  
mayor máximo de todos se alcanza entre las edades de 180 ó 270 ó 365 días, es decir, de unos 180 a 275 días después que el de su cemento portland matriz P ó PY solo, siendo la única diferencia de uno a otro, el orden de sus valores respectivos según el párrafo final de la discusión siguiente.
- $\frac{a}{c} = c = \text{cte.}$ , si el cemento portland matriz acompañante es,
  - . de elevado contenido de  $C_3A$ , caso del P-1, P-2, P-4 y P-32, ocurre a igual edad que en el caso anterior, ó
  - . de mediando a prácticamente nulo contenido de  $C_3A$ , ocurre entre las edades de 60 ó 90 ó 120 ó 150 días, según los casos,y una vez alcanzado el mismo, los valores disminuyen hasta la edad final del ensayo; ocurriendo en cierta medida otro tanto en las probetas homónimas de los cementos de mezcla PA ó PUZ de puzolana N, sólo que las fechas de consecución de los mínimos máximos citados, en cada caso, no son, por lo común, coincidentes con los correspondientes de aquélla.



- desde el momento inicial (desenmoldado de las probetas), hasta la edad de,
  - . 7, 14, 21, 28 ó 60 días para  $\frac{a}{c} = d$ , y
  - . 0 ó 14 días para  $\frac{a}{c} = c$ ,
 para la puzolana D y N, siendo en ambos casos el menor alcanzado durante todo el ensayo.

2ª.- Sea cual fuere la familia de cementos de mezcla PA y/o PUZ preparada con cada una de las puzolanas D y N respectivamente y así ensayadas, a igualdad de edad y forma de obtención del agua de amasado, se cumple que la porosidad de sus probetas respectivas es bastante mayor que la de la correspondiente a su cemento portland matriz acompañante común P ó PY solo, aumentando tal diferencia en valor absoluto, es decir, a igualdad de familia de cementos de mezcla conforme aumenta el contenido de la puzolana D ó N, respectivamente, a aquél, y viceversa, en cuyo caso, presencia en exclusiva de aquél P ó PY solo, tal porosidad es la menor de todas, es decir,

< Poros <	P-nº ó PY-nº/D ó N; 100/00 < 80/20 < 70/30 < 60/40	p.f.e.
-----------	--	--------

en valor relativo, es decir, a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, conforme disminuye el contenido de  $C_3A$  de aquél, es decir,

< Poros <	P-nº/D ó N 80/20, 70/30 ó 60/40 - P-nº < PY-nº/D ó N 80/20, 70/30 ó 60/40 - PY-nº
-----------	---

3ª.- Por lo general a igualdad de edad, cemento de mezcla PA ó PUZ de cemento portland matriz PY y forma de obtención del agua de amasado, el valor de la porosidad de las probetas preparadas con la puzolana N, es mayor que el de las homónimas preparadas con la puzolana D; no ocurriendo idénticamente lo mismo, en idénticos casos, de cemento portland matriz de elevado ó mediano contenido de  $C_3A$ , como son el P-1, P-31 y P-5.

4ª.- A igualdad de edad, cemento de mezcla PA ó PUZ y puzolana, la diferencia entre los valores de porosidad de las probetas de mortero amasadas con  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cnte.}$  y sus homónimas amasadas con  $\frac{a}{c} = c = \text{cnte.}$  es mayor conforme menor es el contenido de cemento portland matriz acompañante, siendo por lo tanto los valores de aquéllas mayores que los de éstas, es decir,

> Poros >	P-nº ó PY-nº/D ó N 80/20 ó 70/30 ó 60/40, $\frac{a}{c} = d \neq \text{cnte.}$
> Poros >	P-nº ó PY-nº/D ó N 80/20 ó 70/30 ó 60/40, $\frac{a}{c} = \text{cnte.}$

	P-nº ó PY-nº/D ó N 80/20 ó 70/30 ó 60/40, $\frac{a}{c} = d \neq \text{cnte.}$
> Poros >	P-nº ó PY-nº/D ó N 80/20 ó 70/30 ó 60/40, $\frac{a}{c} = c = \text{cnte.}$

Discusión VIII.2.2.2.2. (cont.)

(H) Parámetros: Vu,  $\Delta Vu$  y  $Vc/Vu$ , véase Tablas 3, 39, 45, 46, 28 y 30.

1º.- Sea cual fuere el cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con cada una de estas puzolanas D ó N, y así ensayado, con  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cnte.}$  ó  $\frac{a}{c} = c = \text{cnte.}$ , la evolución de los valores de los parámetros Vu,  $\Delta Vu$  y  $Vc/Vu$  de sus probetas respectivas, es de,

- aumento

- . constante para el primero,
- . mas o menos sinuoso para el segundo, pero alcanzando siempre un valor máximo a edad intermedia del ensayo la cual es tanto mas temprana cuanto mayor es la cantidad de puzolana D ó N añadida, y tras la cual prosigue en disminución si tal edad es intermedia, hasta el final del mismo, ó bien se alcanza lógicamente con esta última, y

- disminución para el tercero, hasta su práctica nulidad, pero con el hecho notable de que los máximos valores absolutos y relativos del mismo se alcanzan durante los primeros 28 días del ensayo.

Y todo ello similar, en el fondo que no en la forma, a como ocurriese con su cemento portland matriz respectivo solo.

2º.- Sea cual fuere la familia de cementos de mezcla PA y/o PUZ preparada con cada una de las puzolanas D y N respectivamente y así ensayada, a igualdad de edad y forma de obtención del agua de amasado, se cumple que los valores del parámetro Vu disminuyen con la adición de puzolana D ó N añadida, pero siendo no obstante y por lo general en todos los casos ensayados menor que el de su cemento portland matriz acompañante P ó PY solo

, pese a lo cual tales diferencias tratan de minimizarse conforme transcurre el ensayo, no sin antes haber descrito en su evolución una campana de gauss con salto de aumento brusco de la edad de 28 a la de 60 días. Dicha diferencia, a igualdad de edad, aumenta en todos con la adición de puzolana D ó N, siendo por lo general mayor las de  $\frac{a}{c} = d$  que las de  $\frac{a}{c} = c$  a las edades iniciales y las primeras intermedias, que no en el resto, en las que tratan de igualarse hasta el final del mismo.

Finalmente se ha de destacar también que salvo a las edades de 1 y 7 días, las diferencias aumentan con la disminución del contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante, no ocurriendo lo mismo en el resto, ya que,

- o bien se igualan,
- o bien ocurre ligeramente lo contrario.

Y en cuanto a los parámetros derivados  $\Delta Vu$  y  $Vc\Delta Vu$  se puede decir que ocurre tanto mas todo lo contrario, pero con distintas variaciones, cuanto mas inicial es la edad del ensayo y viceversa.

- 3<sup>a</sup>.- A igualdad de edad, cemento de mezcla y forma de obtención del agua de amasado, los valores de la  $Vu$  de las probetas preparadas con la puzolana D son siempre menores que los correspondientes a la puzolana N, pero ambos menores que los de su cemento matriz acompañante correspondiente solo, ocurriendo todo lo contrario con los parámetros derivados.

Discusión VIII.2.2.2.2. (cont.)

(I) Parámetros:  $SO_4^{=}$ <sub>4lcp</sub> y  $Vv$ , véase Tablas 40, 47 y 30.

- 1<sup>a</sup>.- Sea cual fuere el cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con cada una de estas puzolanas D y N respectivamente, y así ensayado, la evolución de los valores de estos parámetros  $SO_4^{=}$ <sub>4lcp</sub> y  $Vv$  es de aumento apreciable a la edad de 7 días del ensayo, en todos los casos (cuya cuantía es función inversa del contenido de  $C_3A$  de la fracción cemento portland matriz correspondiente), a partir del cual se llega a un valor máximo del mismo, con ó sin disminución previa (según el contenido de  $C_3A$  de la fracción de aquél presente), y alcanzable por lo general a la edad de 28 días en la mayoría de los casos (en 64 de un total de 90 casos); y a partir de este máximo,

- o bien se produce un descenso gradativo del mismo hasta la edad final del ensayo, al igual que ocurriese en la forma, que no en su cuantía, con su cemento portland matriz conformante P respectivo,
- o bien se produce un ligero descenso, ó no, para ascender gradativamente hasta la edad final del ensayo, al igual que ocurriese con su cemento portland matriz conformante PY respectivo, en el cual el ascenso gradativo se verifica desde la edad inicial del ensayo hasta su final,

y ocurriendo otro tanto con la  $Vv$ .

No obstante lo realmente interesante de este parámetro en este caso, es que no se detecta con claridad, mediante el mismo, durante qué periodo de tiempo del ensayo se verifica el mayor consumo ó fijación absoluto y relativo de  $SO_4^{=}$  agresivo.

2ª.- Sea cual fuere la familia de cementos de mezcla PA y PUZ preparada con cada una de las puzolanas D y N respectivamente, y así ensayada, a igualdad de edad y forma de obtención del agua de amasado se cumple que la  $SO_4^{=}{}_{4lcp}$  respectivas es bastante mayor que la de las correspondientes a su cemento portland matriz acompañante común P ó PY solo, aumentando tal diferencia,

- en valor absoluto, es decir, a igualdad de familia de cementos de mezcla, conforme aumenta la adición de puzolana D ó N, respectivamente, a aquél, y viceversa, en cuyo caso, más extremo posible ó presencia en exclusiva de aquél P ó PY solo, tal  $SO_4^{=}{}_{4lcp}$  es la menor de todas; por lo tanto y en tal circunstancia dicha diferencia será mayor aún respecto a la del porcentaje de la  $SO_4^{=}{}_{4lcp}$  de aquél P ó PY solo, en el supuesto de que tales puzolanas D ó N únicamente actuasen como un INERTE integral, es decir,

RS

$\leq SO_4^{=}{}_{4lcp} <$	P-nº ó PY-nº/D ó N 80/20 - P-nº ó PY-nº < P-nº ó PY-nº/D ó N 70/30 - - P-nº ó PY-nº < P-nº ó PY-nº/D ó N 60/40 - P-nº ó PY-nº		p.f.e.
	$\frac{P-nº \text{ ó } PY-nº}{D \text{ ó } N}$ ; $x_1$ 100/30 < $x_2$ 80/20 < $x_3$ 70/30 < $x_4$ 60/40		
$80\% \text{ de } x_1 > 70\% \text{ de } x_1 > 60\% \text{ de } x_1$			

- en valor relativo es decir, a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, conforme aumenta el contenido de  $C_3A$  de aquél y la edad del ensayo considerada (excepto entre la P-1/N 80/20-  
-P-1 y la PY-6/N-PY-6),

$\leq SO_4^{=}{}_{4lcp} <$	P-nº/D ó N 80/20 ó 70/30 ó 60/40 - P-nº > PY-nº/D ó N 60/20 ó 70/30 ó 60/40 - PY-nº	a + edad
	P-nº/D ó N 80/20 ó 70/30 ó 60/40 < PY-nº/D ó N 80/20, 70/30, 60/40	p.f.e.

3ª.- Por lo general a igualdad de edad, cemento de mezcla PA ó PUZ y forma de obtención del agua de amasado, el valor de la  $SO_4^{=}{}_{4lcp}$  preparadas con la puzolana D, es mayor que el de las homónimas preparadas con la N, es decir,

$\leq SO_4^{=}{}_{4lcp} <$	P-nº ó PY-nº/N 80/20 ó 70/30 ó 60/40 < P-nº ó PY-nº/D 80/20 ó 70/30 ó 60/40	p.f.e.
----------------------------	---	--------

ocurriendo otro tanto con la velocidad de variación de la  $SO_{41cp}^=$ .

- 4\*.- Por lo general a igualdad de edad y cemento de mezcla 80/20, y puzolana, el valor de la  $SO_{41cp}^=$  amasados con  $\frac{a}{c} = d$  ha resultado ser inferior al de las probetas homónimas amasadas con  $\frac{a}{c} = c$ , es decir,

$$\left\langle SO_{41cp}^= \right\rangle_{P-n^2 \text{ ó } PY-n^2/D \text{ ó } N 80/20} \frac{a}{c} = d \neq \text{cte.} < \left\langle SO_{41cp}^= \right\rangle_{P-n^2 \text{ ó } PY-n^2/D \text{ ó } N 80/20} \frac{a}{c} = c = \text{cte.}$$

- 5\*.- Sea cual fuere el cemento de mezcla preparado con cada una de estas puzolanas D ó N, y así ensayado, la  $SO_{41cp}^=$  respectivas a cualquier edad del ensayo es superior a la que le correspondería en el supuesto de que la puzolana D ó N actuase únicamente como un INERTE<sub>RS</sub> y no como tal puzolana.

#### Interpretación VIII.2.2.2.2. (E)

Probablemente todo ello se deba a idéntica interpretación dada a la discusión 4\* de la puzolana M, ensayada en forma de los cementos de mezcla PA y/o PUZ correspondientes, a través del método L-A, es decir, probablemente debido al contenido de  $Al_2O_3^F$  de la misma, aunque claro está en este caso de la puzolana N, en muchísima menor cuantía que en aquella, a tenor de la calidad y magnitud de los resultados obtenidos con la misma ensayada mediante este método ASTM C 452.

Y es que pese a ser muy posiblemente bastante escaso el contenido de  $Al_2O_3^F$  de la puzolana N respecto de la M, el mismo, al parecer, debe ser, no sólo mayor que el de la puzolana D, sino además lo suficientemente "escandaloso (es decir, reactivo)", como para auto-denunciar su presencia", siempre y cuando la cantidad de  $C_3A$  que le acompañe, en su caso, procedente de su cemento portland matriz acompañante, no lo "enmascare"; de modo y manera que si ésta es muy notable, como ocurre con la del cemento portland matriz acompañante P-1 (14,11%  $C_3A$ ), lo enmascarará, caso de las probetas de los cementos de mezcla P-1/N 80/20 y P-1/N 70/30, y viceversa en caso contrario, caso de las probetas del resto de los cementos de mezcla PA y PUZ, como así ha ocurrido en una gran mayoría de los cementos de mezcla PA y/o PUZ de esta parte del trabajo. De aquí que la discusión 2\*.1 justifique la necesidad del mayor contenido de  $SiO_2^F$  de la puzolana N sobre la D para explicarla; mientras que

la 2<sup>a</sup>.2 y 2<sup>a</sup>.3 justifiquen lo mismo pero respecto al contenido de  $Al_2O_3^r$  de ambas. Todo ello según este método ASTM C 452.

Por otra parte el hecho acaecido del mayor número de casos totales obtenidos— cementos de mezcla y edades—, en los que el  $\overline{AL}$  de las probetas preparadas, con puzolana N (361 casos) son menores que los correspondientes a las homónimas de puzolanas D (158 casos), da pie para poder pensar que pese a estos últimos originados por lo común a edades iniciales o cuando el cemento portland matriz acompañante ha sido de escaso contenido de  $C_3A$ —por la razón anterior del mayor contenido de  $SiO_2^r$  de la puzolana N sobre la D—, aquella, a la larga, logra mostrar una mayor actividad puzolánica ó "anti-sulfato" que ésta, con las consecuencias tecnológicas correspondientes de mayor aumento de PS comunicada a los cementos portland con los que se coaligare adecuadamente en peso. Esto viene a confirmar la conclusión correspondiente obtenida en igual sentido, del ensayo de Fratini realizádole a ambas, pudiéndose precisar además ahora por todo ello, que dicha mayor actividad en tal ensayo de Fratini de la puzolana N sobre D, no sólo ha de ser debido, a la larga, al mayor contenido de  $SiO_2^r$  de la puzolana N sobre la D, según lo dicho al respecto en el ensayo de Fratini de ambas y en el presente ensayo correspondiente a la puzolana N, sino también, a la corta, al mayor contenido de  $Al_2O_3^r$  de aquella sobre ésta, y lógicamente y por reducción, también al escasísimo contenido de  $Fe_2O_3^r$  de ambas, como es lo lógico, es decir, y en definitiva a los Factores Hidráulicos,  $SiO_2^r$ ,  $Al_2O_3^r$  y  $Fe_2O_3^r$  respectivos de las mismas. Ello se ve adicionalmente confirmado por los valores de la  $SO_4^{=}$  lcp respectivas, véase Tablas 40 y 47, los cuales indican que la puzolana D no debe fijar cantidad apreciable alguna de  $SO_4^{=}$ .

Y como confirmación está el que los valores de la  $V_{cl}$  — en el caso de que el cemento portland matriz conformante sea de elevado contenido de  $C_3A$ —, sean superiores en las probetas de los cementos de mezcla preparados con la puzolana D, a los preparados con la N, señal inequívoca de que la cantidad de  $SiO_2^r$  de aquella debe ser menor que la de ésta, por cuya causa, y a la larga, la puzolana N debe de proteger más del ataque selenitoso que la D y originar por tanto menores valores de  $\overline{AL}$  y  $V_{cl}$ , como así ha ocurrido en este trabajo en las probetas de los cementos de mezcla 80/20 y 70/30 de la mayoría de las familias, que no para los 60/40 hermanos

respectivos, ya que en estos últimos la aportación de  $Al_2O_3^{r-}$  de esta puzolana N, a la vez que  $SiO_2^{r-}$  puede ser ya la suficiente como para invertir los resultados, como así ha ocurrido también en este trabajo.

Y en cuanto a las hipótesis existentes por los que la actividad de ambas puzolanas silícicas D y N, se traduce en un aumento de RS comunicado al cemento portland matriz con el que se coaliguen, en peso, adecuadamente,

- la una basada en que tanto la disminución de  $Ca^{2+}$  como de  $OH^-$  en la fase líquida del ensayo de Fratini, impedirían la consecución del pH adecuado, mayor de 10,8, para la formación y precipitación de ettringita expansiva, y

- la otra basada en la dificultad que al trasiego iónico, necesario para la formación de tal ettringita, oponen los adecuados geles tobermoríticos de neoformación y origen  $SiO_2^{r-}$  de ambas puzolanas, (véase también el párrafo final de la interpretación VIII.2.2.2.2.(F)), se puede decir con fundamento que a pesar de verificarse la primera de una forma más acentuada aún, ver Fig. 4, y resultados del ensayo de Fratini en el caso de la puzolana "aluminica" M, totalmente "opuesta" a ambas silícicas D y N según el ensayo L-A, y no anularse, pese a ello, la formación de ettringita de cualquier origen y etiología, sino todo lo contrario, casos de adición y sinergismo habidos cuando se ensayó esta puzolana M según el ensayo anterior, no puede admitirse como hipótesis única, absoluta y en exclusiva la primera, y si en cambio, por reducción la segunda.

Por otra parte el hecho ocurrido de que los valores de  $\overline{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  de las probetas preparadas con la puzolana N, a las primeras edades del ensayo, sobre todo la de 7 días, aumenten generalmente con la adición de puzolana N, y estén por tanto más relacionados con el contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  que de  $SiO_2^{r-}$  de la misma, indica que en este ensayo ASTM C 452 la  $V_f$  de la ett-rf ha de ser mayor que la  $V_f$  de los geles  $CSH_{SiO_2^{r-}}$  de aquella. Y del mismo modo y por todo lo contrario, en el caso de la puzolana D, indica que la  $V_f$  de la ett-lf ha de ser menoscabada por la  $V_f$  de los  $CSH_{SiO_2^{r-}}$  de ésta.

Y finalmente la comparación de valores del  $\overline{\Delta L}$  de las probetas obtenidos en cada caso con los correspondientes  $\overline{\Delta L}$  que se hubiesen obtenido en el supuesto de que ambas puzolanas sólo hubiesen actuado como un INERTE<sub>RS</sub> confirma lo dicho en la interpretación de la discusión 2ª y siguientes correspondientes a la puzolana D, y es que tales puzolanas se puede decir que tienen una doble actuación desde el

punto de vista de la RS,

- como un  $\text{INERTE}_{RS}$  aparente, que no real, puesto que generalmente disminuyen el  $\Delta L$  de las probetas del cemento portland matriz acompañante P y/o PY solo con el que se mezclaren, ó  $\text{INERTE}_{RS}$ , y
- como tal puzolana, puesto que tal disminución anterior suele ser ligeramente inferior-o superior a edades tempranas e inferior a las intermedias y/o tardías-, que le debería corresponder, si únicamente actuasen como un  $\text{INERTE}_{RS}$ .

Por lo tanto, y según lo anterior una puzolana perteneciente a este grupo tan característico, se podría decir que es "tanto más eminentemente silícica" cuanto mayor y más duradera es la diferencia entre los valores de  $\Delta L$  y Vcl que se obtendrían de sus probetas, en el supuesto de que únicamente actuase como un  $\text{INERTE}_{RS}$ , y los obtenidos en la realidad con un cemento matriz acompañante PY de muy escaso contenido de  $C_3A$ .

Y como confirmación definitiva de que la actuación de estas puzolanas D y N, es primordialmente como tal puzolana y sólo subsidiariamente como un  $\text{INERTE}_{RS}$  aparente, está la interpretación correspondiente a la discusión VIII.2.2.2.2. (E), 5ª anterior, y es que

- si el cemento portland P-1 solo (100% de P-1) tiene de  $SO_4^{=}$  lcp a la edad de 7 días =  $0,4710 \frac{g.SO_3}{1}$ ,

- el cemento de mezcla PA hipotético  $\frac{P-1}{\text{Inerte}_{RS}}$  80/20, o sea, con tan sólo un 80% de P-1, debería tener:

$$(0,4710/0,8) = 0,58875 \text{ g. } SO_3/1,$$

- luego si D ó N únicamente hubiesen actuado como un  $\text{INERTE}_{RS}$  integral y no como tales puzolanas, sus cementos de mezcla P-1/D 80/20 y P-1/N 80/20 respectivos deberían haber tenido por valores de  $SO_4^{=}$  lcp correspondientes, 0,58875 g. $SO_3/1$ , y no 0,6827 g. $SO_3/1$  y 0,6641 g.  $SO_3/1$ , respectivamente, como ha ocurrido en la realidad en el caso - más desfavorable elegido de todos los existentes, o bien ser la del P-2 ó P-4 solo

ocurriendo otro tanto y mejor aún con cualquier otro cemento de mezcla y edad que se eligiere de todos los preparados y así ensayados, con lo que de este modo queda demostrada la actuación fundamental de dichas puzolanas D y N como tales y sólo subsidiariamente como un  $\text{INERTE}_{RS}$  ficticio, que no real.



Y relacionando estas razones con las dadas a propósito para comprender como puede ser la actuación protectora de los geles tobermoríticos  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r}}$  de origen puzolánico D al final de la interpretación VIII.1.2.2.1 (3), correspondiente a su 3ª discusión, y de la discusión del presente apartado, se ha de decir también que en el supuesto de que fuera cierta la hipótesis de la actuación a modo de "almacenamiento" de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r}}$  recién formados para la etf-1f formada al unísono (y hasta su totalidad), las cantidades de  $\text{SO}_4^{2-}$  de las probetas de los cementos de mezcla P-1/D6N 80/20, 70/30 y 60/40 serían, a igualdad de todo lo demás, ser iguales o muy próximos, o bien,

- a los valores de los cálculos correspondientes anteriores, es decir  $\text{SO}_4^{2-} = 10,5$  a  $11,5$  g/l de P-1/D, 0, 0,0 y 0,0 g/l = P-1/D6N 80/20, 70/30 y 60/40, respectivamente, o bien

- a los valores de las probetas de los cementos P-2 ó P-4, P-32 y P-31, respectivamente, en el supuesto de que D (ó N) hubiesen actuado únicamente como un  $\text{Inhibidor}$ , o bien

- agotarse prácticamente por estequiometría, caso del P-1/D 80/20 y caso del P-1/D 60/40, valores todos ellos mayores del 7,0% de  $\text{SO}_4^{2-}$  que éstos común e inicialmente,

Y ninguno de tales hechos ocurre (sino todo lo contrario); Y además y en ambas comparaciones con gran diferencia a favor de los cementos de mezcla P-1/D6N 80/20, 70/30 y 60/40 (con el P-4 a partir de la edad de 50 días en adelante);

Con lo cual no sólo se confirma lo debatido antes de esto, sino además que la hipótesis de la actuación de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r}}$  a modo de "almacenamiento" parece no tener fundamento.

Finalmente véase además la parte correspondiente de lo dicho aquí a propósito de estas puzolanas silíceas D y N, la parte final de la interpretación VIII.1.2.2.1.

(\*) Probable mayor reactividad de la  $\text{SiO}_2$  de la N sobre la D (véase ensayo de Fratini y ASTM C 452), en el primero, y mayor cantidad de  $\text{SiO}_2^{\text{r}}$  y  $\text{SiO}_3^{\text{r}}$  en el segundo, o sea, la puzolana D ensayada según el método L-A y el método ASTM C 452 e H-1.

(2\*) Lo cual implicaría que habría que admitir por verdadero que la  $V_{\text{fCSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r}}}$  es sobre todo mayor o a lo sumo igual, pero jamás menor, que la  $V_{\text{f etf-1f}}$ , lo cual y al parecer no es cierto, según lo dicho a propósito en la pág. 352.

o Tipo de produto: *feijão*, ASTM C 492 - H<sub>2</sub>O  
o Instrumento utilizado (em qual norma): *4000* - 1991

TABLE 41

o Fotografia(s) correspondente(s) com  
Tamanho: 10x15

EBAO (64x64)	CEMENTO P-1 /PUZOLANA N			CEMENTO P-2 /PUZOLANA N			CEMENTO P-3 /PUZOLANA N			CEMENTO P-5 /PUZOLANA N			CEMENTO P-11 /PUZOLANA N			
	AL	AL	AL	AL	AL	AL	AL	AL	AL	AL	AL	AL	AL	AL		
	NU	NU	NU	NU	NU	NU	NU	NU	NU	NU	NU	NU	NU	NU		
	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	
7	282	74,3	288	95,6	291	118,8	298	95,6	299	71,6	306	75,7	304	95,7	306	75,7
14	289	71,6	298	95,6	298	95,6	299	72,9	306	71,6	306	72,9	306	72,9	306	71,6
21	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
28	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
35	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
42	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
49	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
56	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
63	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
70	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
77	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
84	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
91	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
98	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
105	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
112	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
119	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
126	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
133	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
140	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
147	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
154	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
161	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
168	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
175	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
182	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
189	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
196	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
203	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
210	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
217	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
224	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
231	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
238	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
245	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
252	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
259	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
266	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
273	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
280	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
287	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
294	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
301	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
308	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
315	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
322	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
329	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
336	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
343	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
350	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
357	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
364	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
371	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
378	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
385	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
392	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
399	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
406	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
413	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
420	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
427	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
434	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
441	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
448	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
455	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
462	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
469	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
476	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
483	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
490	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
497	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
504	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
511	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
518	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
525	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
532	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
539	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
546	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
553	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
560	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6	306	71,6
567	298	71,6	298	95,6	298	95,6	299	71,6	306	71,6	3					

TABLA 42

TABLA 42

[illegible]

a) Fotografia(s) correspondente(s) a este  
Tema: 2.8.3/

2025-07-10 10:00:00 1000

o Tabela de proporção está de acordo com a ASTM C 452-68 e N-1  
o Proporção de materiais é a mesma: 1:1,6:2,8 e 0,45 (kg/m³)

TABELA 44

o Para obter a resistência característica de compressão (MPa) basta multiplicar o valor da resistência média (MPa) por 1,35

ID	CEMENTO P-1 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-3 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-5 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-11 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-4 / PUZZOLANA N		
	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40
7	15,40	11,51	8,23	1,38	11,54	7,22	15,42	1,42	10,80	7,11	15,58	10,44	7,81	1,48	10,80
14	4,79	5,33	7,28	1,21	11,22	10,28	4,25	4,35	4,52	5,27	10,29	6,27	5,58	2,48	7,43
21	3,81	1,22	2,25	1,32	8,48	10,48	7,25	8,58	8,68	6,29	8,68	6,29	1,28	1,28	8,68
28	3,49	2,38	3,48	1,28	10,48	11,24	4,24	4,32	4,54	1,21	6,29	6,29	2,48	1,44	5,52
60	4,58	3,18	7,49	1,28	7,25	1,58	4,48	4,58	4,29	1,25	1,35	6,18	8,48	1,27	2,19
90	4,51	3,11	5,56	2,34	1,48	1,58	1,19	1,47	0,29	2,29	7,43	1,29	1,28	4,48	1,57
120	1,28	1,58	6,21	4,51	4,58	2,28	0,14	0,32	1,28	0,88	1,48	1,54	0,72	0,45	1,85
150	3,28	4,58	4,14	1,17	0,14	1,21	3,28	0,48	8,54	1,58	0,48	1,21	6,53	0,58	2,76
180	3,11	4,48	4,38	0,32	0,40	0,48	6,12	0,72	4,58	2,25	0,21	1,44	6,57	0,43	1,45
270	3,19	4,28	3,18	4,28	0,25	0,24	4,27	0,15	4,48	6,48	4,28	4,28	4,27	0,19	0,48
365	4,48	0,18	4,48	0,18	4,48	4,48	4,48	0,18	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	0,18	4,48
545	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48
730	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48
ID	CEMENTO P-1 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-3 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-5 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-11 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-4 / PUZZOLANA N		
ID	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40
7	18,13	15,42	22,20	11,51	4,32	11,29				5,48	10,48	1,53	8,48	14,48	11,25
14	8,23	11,22	10,48	11,48	25,42	15,21				7,48	5,42	5,29	1,38	11,48	4,21
21	2,48	1,22	8,48	6,29	4,48	11,18				4,18	4,58	4,47	2,48	3,29	1,28
28	3,29	1,41	2,51	1,58	16,41	15,58				3,28	6,21	3,49	17,15	3,48	1,58
60	7,42	4,79	1,28	4,48	2,47	4,29				7,48	0,44	2,33	3,41	1,28	0,48
90	2,27	1,32	7,48	1,34	4,48	7,43				0,22	4,18	0,38	8,48	1,28	0,58
120	2,28	4,22	1,28	1,21	2,77	5,48				0,88	0,58	0,21	3,53	0,22	1,25
150	0,48	4,44	1,35	2,22	5,77	2,42				0,77	0,45	0,38	0,45	2,17	1,08
180	0,48	0,58	1,41	1,12	4,48	1,18				0,48	0,48	0,38	0,48	0,15	1,28
270	0,48	0,48	4,48	4,48	4,48	4,48				0,48	0,48	0,38	0,48	4,48	4,48
365	0,48	0,48	4,48	4,48	4,48	4,48				0,48	0,48	0,38	0,48	4,48	4,48
545	0,48	0,48	4,48	4,48	4,48	4,48				0,48	0,48	0,38	0,48	4,48	4,48
730	0,48	0,48	4,48	4,48	4,48	4,48				0,48	0,48	0,38	0,48	4,48	4,48
ID	CEMENTO P-1 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-3 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-5 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-11 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-4 / PUZZOLANA N		
ID	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40
7	17,21	15,46	22,48	11,51	4,32	11,29				6,21	7,22	13,48	18,27	15,51	8,48
14	3,24	1,28	2,48	1,44	1,48	1,48				1,48	7,45	4,52	8,48	8,48	1,28
21	1,48	1,58	8,48	5,58	3,28	5,12				2,58	1,58	3,19	0,21	8,48	17,48
28	2,38	1,21	7,29	1,48	6,19	5,27				2,27	2,48	5,71	8,48	7,48	1,48
60	4,58	4,48	4,48	4,48	1,25	4,42				2,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48
90	4,48	11,22	6,29	6,48	4,27	1,48				0,21	4,48	1,48	1,48	4,48	4,48
120	0,48	4,48	1,48	4,48	0,54	1,29				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
150	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
180	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
270	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
365	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
545	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
730	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
ID	CEMENTO P-1 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-3 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-5 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-11 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-4 / PUZZOLANA N		
ID	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40
7	17,21	15,46	22,48	11,51	4,32	11,29				6,21	7,22	13,48	18,27	15,51	8,48
14	3,24	1,28	2,48	1,44	1,48	1,48				1,48	7,45	4,52	8,48	8,48	1,28
21	1,48	1,58	8,48	5,58	3,28	5,12				2,58	1,58	3,19	0,21	8,48	17,48
28	2,38	1,21	7,29	1,48	6,19	5,27				2,27	2,48	5,71	8,48	7,48	1,48
60	4,58	4,48	4,48	4,48	1,25	4,42				2,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48
90	4,48	11,22	6,29	6,48	4,27	1,48				0,21	4,48	1,48	1,48	4,48	4,48
120	0,48	4,48	1,48	4,48	0,54	1,29				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
150	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
180	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
270	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
365	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
545	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48
730	0,48	4,48	0,48	4,48	1,48	2,28				0,48	4,48	0,48	4,48	4,48	4,48

Atenção do usuário: este é um sistema de unidades ASTM C 459-68 e não é  
 uma conversão de unidades para o sistema métrico (SI) da mesma forma (kg/m³) para (kg/m³).

TABLA 45

Atenção do usuário: este é um sistema de unidades ASTM C 459-68 e não é  
 uma conversão de unidades para o sistema métrico (SI) da mesma forma (kg/m³) para (kg/m³).

ID	CEM	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N			CEMENTO P-3 / PUZOLANA N			CEMENTO P-5 / PUZOLANA N			CEMENTO P-7 / PUZOLANA N			CEMENTO P-9 / PUZOLANA N			
		80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	
11		27.5	2.78	27.8	2.77	28.1	2.76	28.4	2.75	28.7	2.74	29.0	2.73	29.3	2.72	29.6	2.71
77		28.1	2.77	28.4	2.76	28.7	2.75	29.0	2.74	29.3	2.73	29.6	2.72	29.9	2.71	30.2	2.70
114		28.7	2.76	29.0	2.75	29.3	2.74	29.6	2.73	29.9	2.72	30.2	2.71	30.5	2.70	30.8	2.69
221		29.3	2.75	29.6	2.74	29.9	2.73	30.2	2.72	30.5	2.71	30.8	2.70	31.1	2.69	31.4	2.68
228		29.9	2.74	30.2	2.73	30.5	2.72	30.8	2.71	31.1	2.70	31.4	2.69	31.7	2.68	32.0	2.67
460		30.5	2.73	30.8	2.72	31.1	2.71	31.4	2.70	31.7	2.69	32.0	2.68	32.3	2.67	32.6	2.66
990		31.1	2.72	31.4	2.71	31.7	2.70	32.0	2.69	32.3	2.68	32.6	2.67	32.9	2.66	33.2	2.65
1220		31.7	2.71	32.0	2.70	32.3	2.69	32.6	2.68	32.9	2.67	33.2	2.66	33.5	2.65	33.8	2.64
1590		32.3	2.70	32.6	2.69	32.9	2.68	33.2	2.67	33.5	2.66	33.8	2.65	34.1	2.64	34.4	2.63
1880		32.9	2.69	33.2	2.68	33.5	2.67	33.8	2.66	34.1	2.65	34.4	2.64	34.7	2.63	35.0	2.62
2270		33.5	2.68	33.8	2.67	34.1	2.66	34.4	2.65	34.7	2.64	35.0	2.63	35.3	2.62	35.6	2.61
3465		34.1	2.67	34.4	2.66	34.7	2.65	35.0	2.64	35.3	2.63	35.6	2.62	35.9	2.61	36.2	2.60
5445		34.7	2.66	35.0	2.65	35.3	2.64	35.6	2.63	35.9	2.62	36.2	2.61	36.5	2.60	36.8	2.59
7330		35.3	2.65	35.6	2.64	35.9	2.63	36.2	2.62	36.5	2.61	36.8	2.60	37.1	2.59	37.4	2.58
ID	CEM	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N			CEMENTO P-3 / PUZOLANA N			CEMENTO P-5 / PUZOLANA N			CEMENTO P-7 / PUZOLANA N			CEMENTO P-9 / PUZOLANA N			
(60/40)	(60/40)	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	(P-7/D1)	(P-7/M1)	(P-7/D1)	(P-7/A1)	(P-7/C1)	(P-7/M1)	
11		27.5	2.78	27.8	2.77	28.1	2.76	28.4	2.75	28.7	2.74	29.0	2.73	29.3	2.72	29.6	2.71
77		28.1	2.77	28.4	2.76	28.7	2.75	29.0	2.74	29.3	2.73	29.6	2.72	29.9	2.71	30.2	2.70
144		28.7	2.76	29.0	2.75	29.3	2.74	29.6	2.73	29.9	2.72	30.2	2.71	30.5	2.70	30.8	2.69
221		29.3	2.75	29.6	2.74	29.9	2.73	30.2	2.72	30.5	2.71	30.8	2.70	31.1	2.69	31.4	2.68
228		29.9	2.74	30.2	2.73	30.5	2.72	30.8	2.71	31.1	2.70	31.4	2.69	31.7	2.68	32.0	2.67
460		30.5	2.73	30.8	2.72	31.1	2.71	31.4	2.70	31.7	2.69	32.0	2.68	32.3	2.67	32.6	2.66
990		31.1	2.72	31.4	2.71	31.7	2.70	32.0	2.69	32.3	2.68	32.6	2.67	32.9	2.66	33.2	2.65
1220		31.7	2.71	32.0	2.70	32.3	2.69	32.6	2.68	32.9	2.67	33.2	2.66	33.5	2.65	33.8	2.64
1590		32.3	2.70	32.6	2.69	32.9	2.68	33.2	2.67	33.5	2.66	33.8	2.65	34.1	2.64	34.4	2.63
1880		32.9	2.69	33.2	2.68	33.5	2.67	33.8	2.66	34.1	2.65	34.4	2.64	34.7	2.63	35.0	2.62
2270		33.5	2.68	33.8	2.67	34.1	2.66	34.4	2.65	34.7	2.64	35.0	2.63	35.3	2.62	35.6	2.61
3465		34.1	2.67	34.4	2.66	34.7	2.65	35.0	2.64	35.3	2.63	35.6	2.62	35.9	2.61	36.2	2.60
5445		34.7	2.66	35.0	2.65	35.3	2.64	35.6	2.63	35.9	2.62	36.2	2.61	36.5	2.60	36.8	2.59
7330		35.3	2.65	35.6	2.64	35.9	2.63	36.2	2.62	36.5	2.61	36.8	2.60	37.1	2.59	37.4	2.58
ID	CEM	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N			CEMENTO P-3 / PUZOLANA N			CEMENTO P-5 / PUZOLANA N			CEMENTO P-7 / PUZOLANA N			CEMENTO P-9 / PUZOLANA N			
(60/40)	(60/40)	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	(P-7/D1)	(P-7/M1)	(P-7/D1)	(P-7/A1)	(P-7/C1)	(P-7/M1)	
11		27.5	2.78	27.8	2.77	28.1	2.76	28.4	2.75	28.7	2.74	29.0	2.73	29.3	2.72	29.6	2.71
77		28.1	2.77	28.4	2.76	28.7	2.75	29.0	2.74	29.3	2.73	29.6	2.72	29.9	2.71	30.2	2.70
144		28.7	2.76	29.0	2.75	29.3	2.74	29.6	2.73	29.9	2.72	30.2	2.71	30.5	2.70	30.8	2.69
221		29.3	2.75	29.6	2.74	29.9	2.73	30.2	2.72	30.5	2.71	30.8	2.70	31.1	2.69	31.4	2.68
228		29.9	2.74	30.2	2.73	30.5	2.72	30.8	2.71	31.1	2.70	31.4	2.69	31.7	2.68	32.0	2.67
460		30.5	2.73	30.8	2.72	31.1	2.71	31.4	2.70	31.7	2.69	32.0	2.68	32.3	2.67	32.6	2.66
990		31.1	2.72	31.4	2.71	31.7	2.70	32.0	2.69	32.3	2.68	32.6	2.67	32.9	2.66	33.2	2.65
1220		31.7	2.71	32.0	2.70	32.3	2.69	32.6	2.68	32.9	2.67	33.2	2.66	33.5	2.65	33.8	2.64
1590		32.3	2.70	32.6	2.69	32.9	2.68	33.2	2.67	33.5	2.66	33.8	2.65	34.1	2.64	34.4	2.63
1880		32.9	2.69	33.2	2.68	33.5	2.67	33.8	2.66	34.1	2.65	34.4	2.64	34.7	2.63	35.0	2.62
2270		33.5	2.68	33.8	2.67	34.1	2.66	34.4	2.65	34.7	2.64	35.0	2.63	35.3	2.62	35.6	2.61
3465		34.1	2.67	34.4	2.66	34.7	2.65	35.0	2.64	35.3	2.63	35.6	2.62	35.9	2.61	36.2	2.60
5445		34.7	2.66	35.0	2.65	35.3	2.64	35.6	2.63	35.9	2.62	36.2	2.61	36.5	2.60	36.8	2.59
7330		35.3	2.65	35.6	2.64	35.9	2.63	36.2	2.62	36.5	2.61	36.8	2.60	37.1	2.59	37.4	2.58
ID	CEM	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N			CEMENTO P-3 / PUZOLANA N			CEMENTO P-5 / PUZOLANA N			CEMENTO P-7 / PUZOLANA N			CEMENTO P-9 / PUZOLANA N			
(60/40)	(60/40)	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	(P-7/D1)	(P-7/M1)	(P-7/D1)	(P-7/A1)	(P-7/C1)	(P-7/M1)	
11		27.5	2.78	27.8	2.77	28.1	2.76	28.4	2.75	28.7	2.74	29.0	2.73	29.3	2.72	29.6	2.71
77		28.1	2.77	28.4	2.76	28.7	2.75	29.0	2.74	29.3	2.73	29.6	2.72	29.9	2.71	30.2	2.70
144		28.7	2.76	29.0	2.75	29.3	2.74	29.6	2.73	29.9	2.72	30.2	2.71	30.5	2.70	30.8	2.69
221		29.3	2.75	29.6	2.74	29.9	2.73	30.2	2.72	30.5	2.71	30.8	2.70	31.1	2.69	31.4	2.68
228		29.9	2.74	30.2	2.73	30.5	2.72	30.8	2.71	31.1	2.70	31.4	2.69	31.7	2.68	32.0	2.67
460		30.5	2.73	30.8	2.72	31.1	2.71	31.4	2.70	31.7	2.69	32.0	2.68	32.3	2.67	32.6	2.66
990		31.1	2.72	31.4	2.71	31.7	2.70	32.0	2.69	32.3	2.68	32.6	2.67	32.9	2.66	33.2	2.65
1220		31.7	2.71	32.0	2.70	32.3	2.69	32.6	2.68	32.9	2.67	33.2	2.66	33.5	2.65	33.8	2.64
1590		32.3	2.70	32.6	2.69	32.9	2.68	33.2	2.67	33.5	2.66	33.8	2.65	34.1	2.64	34.4	2.63
1880		32.9	2.69	33.2	2.68	33.5	2.67	33.8	2.66	34.1	2.65	34.4	2.64	34.7	2.63	35.0	2.62
2270		33.5	2.68	33.8	2.67	34.1	2.66	34.4	2.65	34.7	2.64	35.0	2.63	35.3	2.62	35.6	2.61
3465		34.1	2.67	34.4	2.66	34.7	2.65	35.0	2.64	35.3	2.63	35.6	2.62	35.9	2.61	36.2	2.60
5445		34.7	2.66	35.0	2.65	35.3	2.64	35.6	2.63	35.9	2.62	36.2	2.61	36.5	2.60	36.8	2.59
7330		35.3	2.65	35.6	2.64	35.9	2.63	36.2	2.62	36.5	2.61	36.8	2.60	37.1	2.59	37.4	2.58
ID	CEM	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N			CEMENTO P-3 / PUZOLANA N			CEMENTO P-5 / PUZOLANA N			CEMENTO P-7 / PUZOLANA N			CEMENTO P-9 / PUZOLANA N			
(60/40)	(60/40)	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	(P-7/D1)	(P-7/M1)	(P-7/D1)	(P-7/A1)	(P-7/C1)	(P-7/M1)	
11		27.5	2.78	27.8	2.77	28.1	2.76	28.4	2.75	28.7	2.74	29.0	2.73	29.3	2.72	29.6	2.71
77		28.1	2.77	28.4	2.76	28.7	2.75	29.0	2.74	29.3	2.73	29.6	2.72	29.9	2.71	30.2	2.70
144		28.7	2.76	29.0	2.75	29.3	2.74	29.6	2.73	29.9	2.72	30.2	2.71	30.5	2.70	30.8	2.69
221		29.3	2.75	29.6	2.74	29.9	2.73	30.2	2.72	30.5	2.71	30.8	2.70	31.1	2.69	31.4	2.68
228		29.9	2.74	30.2	2.73	30.5	2.72	30.8	2.71	31.1	2.70	31.4	2.69	31.7	2.68	32.0	2.67
460		30.5	2.73	30.8	2.72	31.1	2.71	31.4	2.70	31.7	2.69	32.0	2.68	32.3	2.67	32.6	2.66
990		31.1	2.72	31.4	2.71	31.7	2.70	32.0	2.69	32.3	2.68	32.6	2.67	32.9	2.66	33.2	2.65
1220		31.7	2.71	32.0	2.70	32.3	2.69	32.6	2.68	32.9	2.67	33.2	2.66	33.5	2.65	33.8	2.64
1590		32.3	2.70	32.6	2.69	32.9	2.68	33.2	2.67	33.5	2.66	33.8	2.65	34.1	2.64	34.4	2.63
1880		32.9	2.69	33.2	2.68	33.5	2.67	33.8	2.66	34.1	2.65	34.4	2.64	34.7	2.63	35.0	2.62
2270		33.5	2.68	33.8	2.67	34.1	2.66	34.4	2.65	34.7	2.64	35.0	2.63	35.3	2.62	35.6	2.61
3465		34.1	2.67	34.4	2.66	34.7	2.65	35.0	2.64	35.3	2.63	35.6	2.62	35.9	2.61	36.2	2.60
5445		34.7	2.66	35.0													

• Tuna de prueba:  $f_c = 11 \text{ MPa}$  ASTM C 456-08 e N-1  
• Parámetros de admisión de arena:  $d_{50}(\%) = 4,8$  y  $d_{10}(\%) = 0,4$

TABLA 46

• Fotografías (a) correspondientes a este  
Foto: (a) (a)

Edad (días)	CEMENTO P-1 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-2 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-3 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-4 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-5 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-6 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-7 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-8 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-9 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-10 / PUZZOLANA N																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
7	28,8	2,50	73,8	6,8	68,8	7,78	21,8	1,12	32,2	6,78	76,2	8,88	25,8	1,35	32,2	1,88	75,2	1,25	51,5	7,28	77,3	10,48	24,8	6,88	43,8	5,28	51,8	7,38																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
14	27,2	2,82	66,2	1,28	75,8	1,88	28,2	1,28	41,2	1,98	77,8	2,57	35,8	1,21	71,2	1,25	48,2	0,81	58,2	1,28	86,2	2,18	42,8	1,24	56,2	1,28	6,2	2,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
21	33,8	0,82	53,8	0,88	88,2	2,53	34,8	0,218	52,8	0,88	88,2	1,88	43,8	1,21	88,2	1,21	78,8	1,25	88,2	1,25	113,2	1,52	47,2	0,88	88,2	1,25	8,8	2,88																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
28	34,8	0,28	88,2	1,12	6,2	1,28	41,2	1,28	58,2	1,28	108,2	1,51	43,2	0,27	97,8	1,28	108,2	1,25	48,2	1,25	128,2	1,25	58,2	1,28	78,2	1,28	108,2	1,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
40	46,2	0,27	78,2	1,28	108,2	0,28	46,2	1,27	78,2	0,27	108,2	0,27	48,2	1,27	88,2	0,28	108,2	0,27	52,2	1,28	108,2	0,27	88,2	0,28	88,2	0,27	128,2	0,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
60	42,2	0,24	78,2	1,27	108,2	0,28	48,2	0,28	88,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	88,2	0,28	88,2	0,27	128,2	0,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
90	42,2	0,24	78,2	1,27	108,2	0,28	48,2	0,28	88,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	88,2	0,28	88,2	0,27	128,2	0,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
120	42,2	0,24	78,2	1,27	108,2	0,28	48,2	0,28	88,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	88,2	0,28	88,2	0,27	128,2	0,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
150	42,2	0,24	78,2	1,27	108,2	0,28	48,2	0,28	88,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	88,2	0,28	88,2	0,27	128,2	0,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
180	42,2	0,24	78,2	1,27	108,2	0,28	48,2	0,28	88,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	88,2	0,28	88,2	0,27	128,2	0,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
270	42,2	0,24	78,2	1,27	108,2	0,28	48,2	0,28	88,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	88,2	0,28	88,2	0,27	128,2	0,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
365	42,2	0,24	78,2	1,27	108,2	0,28	48,2	0,28	88,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	88,2	0,28	88,2	0,27	128,2	0,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
545	42,2	0,24	78,2	1,27	108,2	0,28	48,2	0,28	88,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	88,2	0,28	88,2	0,27	128,2	0,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
730	42,2	0,24	78,2	1,27	108,2	0,28	48,2	0,28	88,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	108,2	0,28	52,2	0,28	108,2	0,28	88,2	0,28	88,2	0,27	128,2	0,28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Edad (días)	CEMENTO P-11 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-12 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-13 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-14 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-15 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-16 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-17 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-18 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-19 / PUZZOLANA N			CEMENTO P-20 / PUZZOLANA N																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Edad (días)	80/20 70/30 60/40			80/20 70/30 60/40			80/20 70/30 60/40			80/20 70/30 60/40			80/20 70/30 60/40			80/20 70/30 60/40			80/20 70/30 60/40			80/20 70/30 60/40			80/20 70/30 60/40			80/20 70/30 60/40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
7	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2	0,28	88,2	0,23	44,2	0,23	82,2

*Fotografic(s)/correspondent(s) a este  
Topic: NR23*

ID#	$\frac{V_1}{V_2}$ $\frac{V_3}{V_4}$ $\frac{V_5}{V_6}$			$\frac{V_7}{V_8}$ $\frac{V_9}{V_{10}}$ $\frac{V_{11}}{V_{12}}$			$\frac{V_{13}}{V_{14}}$ $\frac{V_{15}}{V_{16}}$ $\frac{V_{17}}{V_{18}}$			$\frac{V_{19}}{V_{20}}$ $\frac{V_{21}}{V_{22}}$ $\frac{V_{23}}{V_{24}}$			$\frac{V_{25}}{V_{26}}$ $\frac{V_{27}}{V_{28}}$ $\frac{V_{29}}{V_{30}}$					
	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N	CEMENTO P-3 / PUZOLANA N	CEMENTO P-5 / PUZOLANA N	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N	CEMENTO P-3 / PUZOLANA N	CEMENTO P-5 / PUZOLANA N	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N	CEMENTO P-3 / PUZOLANA N	CEMENTO P-5 / PUZOLANA N	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N	CEMENTO P-3 / PUZOLANA N	CEMENTO P-5 / PUZOLANA N	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N	CEMENTO P-3 / PUZOLANA N	CEMENTO P-5 / PUZOLANA N	CEMENTO P-1 / PUZOLANA N	CEMENTO P-3 / PUZOLANA N	CEMENTO P-5 / PUZOLANA N
80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	
7	88.11	9.8	79.3	111.5	98.1	114.2	72.5	108.5	88.9	114.5	85.4	92.2	75.1	80.3	72.3	71.8	95.3	72.2
14	56.57	-2.0	107.2	-12.4	80.7	5.4	77.2	1.7	78.8	-2.8	87.9	3.8	78.2	2.4	80.2	4.3	80.2	3.3
21	95.5	8.8	117.4	1.6	100.3	1.0	74.4	1.0	102.5	7.8	98.8	3.7	78.2	1.1	87.9	18.2	98.8	2.2
28	57.5	2.8	76.5	-0.0	100.5	3.8	78.2	1.7	80.2	4.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
34	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
40	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
50	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
60	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
70	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
80	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
90	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
100	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
110	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
120	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
130	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
140	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
150	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
160	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3
170	51.2	-5.2	85.3	-1.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2	3.3	80.2					



Interpretación VIII.2.2.2.2. (F)

De la Discusión 1\*.- Los valores de la  $V_{clRMF}$  y la  $V_{clRMC}$  confirman una vez más que la mayor parte de la hidratación selenitosa de las probetas preparadas con estas puzolanas D y similares, la N, continúa verificándose durante los primeros 28 días del ensayo, de aquí que los valores de estos últimos hayan sido en todos los casos, notablemente superiores a tales edades iniciales que a las posteriores.

De las Discusiones 2\* y 3\*.- Ello se debe a que el carácter hidráulico, y sus consecuencias mecánicas pertinentes, de los  $C_xS_yH_z$  (generalmente cristales diversos), de origen cemento portland, es notablemente superior, por mayor presencia, que el de los geles  $CSH_{SiO_2}$  de la puzolana D, lo cual no implica necesariamente que la Vf correspondiente también lo sea. De aquí que a menor presencia de los primeros en detrimento de los segundos, disminuyan los valores de la RMF y RMC correspondientes y viceversa, en cuyo caso, cemento portland matriz constituyente P ó PY solo, la máxima presencia de aquellos  $C_xS_yH_z$  de origen  $C_3S$  y/o  $C_2S$  preferentemente (y ett-1f en su caso), se deberá traducir, en todos los casos y a igualdad de todo lo demás, en máximos valores de RMF y RMC respectivos, como así ha ocurrido en este trabajo.

Y la participación adicional y efectiva, en su caso, de la ett-1f, en los valores de RMF y RMC alcanzados, se confirma por el hecho de que los mismos disminuyen apreciablemente, y notablemente en ocasiones,

- con la disminución del contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante, (mayor  $SO_4^{=}$  lcp por menor fijación del 7,0% de  $SO_3$  inicial), y
- con la adición de puzolana D (que es otra manera de disminuir el contenido de  $C_3A$  anterior).

Por otra parte ello viene a confirmar más claramente aún que (no con parámetro  $\bar{dL}$ ), el comportamiento de esta puzolana D en este ensayo de RM se asemeja en parte al de un INERTE, pero con la diferencia clara de que el concepto de INERTE, desde el punto de vista de RS, ó  $INERTE_{RS}$ , es MUY DISTINTO del concepto de INERTE desde el punto de vista de RM, ó  $INERTE_{RM}$ , hasta tal punto que puede haber puzolanas que sean los dos a un tiempo, o sólo uno, véase a propósito la pág. 390.

Por otra parte hilvanando con lo dicho al respecto en el párrafo segundo de la interpretación VIII.2.2.2.1. 1ª, se puede decir que si bien la RMF y RMC a las edades iniciales del ensayo, y a más inicial mejor, de las probetas amasadas con agua  $d$  es menor a la de las homónimas amasadas con agua  $c$ -por la razón allí apuntada del exceso de agua  $d$  sobre la  $c$ , y el exceso de porosidad derivada correspondiente a edades posteriores y a más ulterior mejor-, deberá ocurrir precisamente por tal motivo derivado adicional de mayor porosidad de las de  $\frac{a}{c} = d$  (y más aún con la adición de puzolana D o N) a las de  $\frac{a}{c} = c$ , todo lo contrario, pues ello, que en principio es contraproducente, con posterioridad debe de resultar ventajoso, ya que la misma debe facilitar una ulterior y más completa hidratación de la  $SiO_2^{r-}$  de las puzolanas D y N y de las fracciones cementos portland acompañantes respectivas que en las correspondientes de  $\frac{a}{c} = c$ . De aquí que la diferencia entre los valores de porosidad homónimos se debe aminorar con el transcurso del ensayo, como así ha ocurrido en este trabajo, y consiguientemente que a tales edades posteriores, a los valores de las RMF y RMC antes citados les ocurra todo lo contrario que al inicio de aquél, como así ha ocurrido también en este trabajo.

Y respecto a la parte final de la Discusión 2ª se puede decir que ello es un indicio evidente de que,

- la puzolana N debe tener algo más de  $Al_2O_3^{r-}$  que la D, y que
- por tal razón en el caso de los cementos de mezcla PA 80/20 se han de conseguir más pronto las condiciones idóneas de pH y  $Ca(OH)_2$  necesarios para la formación de etf-rf, y lo contrario por idéntico motivo en las probetas correspondientes a sus cementos de mezcla PUZ hermanos 70/30 y 60/40, en dicho orden.

De la discusión 1ª: La explicación probable de lo ocurrido ha de residir también en idéntica razón apuntada en los dos párrafos iniciales de la interpretación VIII.2.2.2.2. (E), es decir a la mayor actividad de la puzolana N sobre la D, por sus probable(s) mayor(es) contenido(s) de  $SiO_2^{r-}$  y/o  $Al_2O_3^{r-}$ , el(os) cual(es) se deberán traducir necesariamente, a igualdad de todo lo demás, en mayores valores de RMF y RMC de las probetas de aquella N, sobre las de ésta D, que es lo ocurrido en este trabajo. No pudiéndose precisar exactamente mediante las técnicas empleadas en este trabajo, si la causa de tal mayoría de los unos sobre los otros ha de ser adscrita mayormente a la

$\text{Al}_2\text{O}_3^{2-}$  ó a la  $\text{SiO}_2^{2-}$  y/o a ambas a un mismo tiempo y distinta cuantía, como al parecer debe ser lo lógico.

Por último y en cuanto al aumento acaecido en los valores de las RMF y RMC con el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento portland matriz acompañante respectivo, se puede decir que ello ha de deberse necesariamente a idéntico razonamiento dado para explicar los similares aumentos habidos en el caso de los 12 cementos portland, 6P y 6PY solos, lo cual vendría a confirmar una vez más,

- a) que la puzolana D actúa en este ensayo RM con un cierto carácter de  $\text{INERTE}_{\text{RM}}$ , y que para que el mismo sea igual en valor absoluto y sin más trascendencia al de  $\text{INERTE}_{\text{RS}}$ , la diferencia entre los valores de los mismos y sus correspondientes porcentajes de los parámetros respectivos  $\bar{L}$ , RMF y RMC del cemento portland matriz constituyente solo, han de ser iguales,
- b) que la sola presencia de puzolana D, no evita la formación de la ett-lf expansiva, y si sólo la adecuada presencia de la misma en cada caso concreto, lo cual coincide con la conclusión VII.4.2.11\* (POP) (M.VIII.1.2.2.1.,6\* (L-A)), la cual deberá de participar de algún modo en la consecución de los mismos.
- c) que el comportamiento puzolánico tan característico de esta puzolana D podría ser además de el de retardar e impedir la formación de la ett-lf, el de aminorar adicionalmente sus efectos nocivos merced a la auto-colmatación del interior de los caparazones ó estuches vítreos que la constituyen,
  - bien por la propia fuerza expansora con que se genera,
  - bien por el mecanismo previo de through-solution total ó solo zonal ó local,
  - bien por ambas causas anteriores a un tiempo en mayor o menor medida.

pero esta hipótesis se menoscabada por la razón dada especialmente en la pág. 380 .  
Interpretación VIII.2.2.2.2 (G) y (H)

De la discusión 1\* (G):

- Caso de la  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$  - Aquí se puede aplicar íntegramente la misma razón dada para el caso de los cementos portland matrices correspondientes solos , con la única diferencia de que en este caso al estar presente la puzolana D ó H, los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{2-}$  de las mismas, al dificultar al parecer el trasiego iónico, deben de retardar algo con ello el proceso global de hidratación selenitosa y con él la formación de ett-lf y los  $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$  mas o menos cristalinos de origen  $\text{C}_3\text{S}$  y/o  $\text{C}_2\text{S}$  (amén de

otros hidratos de calcio diversos), y por lo tanto sus efectos derivados respectivos mas o menos colmatantes, con respecto al correspondiente a su cemento portland acompañante respectivo solo.

- Caso de la  $\frac{a}{c} = c$ . - Aquí se puede decir otro tanto al igual que en el caso anterior para aquellos cementos de mezcla PA ó PUZ de cemento portland matriz acompañante común de elevado ó mediano contenido de  $C_3A$  pero no para los del resto, hasta su práctica nulidad en dicho contenido; en los cuales al ser también la  $ett-lf$  total a formar prácticamente escasa, sus probetas derivadas, aún en sus moldes, podrán poseer su porosidad total respectiva menor que la de todos los casos anteriores y consiguientemente formarse mas difícilmente toda la  $ett-lf$ , la cual por dicho motivo puede no llegar a formarse en su totalidad con lo que los máximos valores de aquella se alcanzarían con mayor prontitud según lo ocurrido en este trabajo.

Finalmente alcanzado en cada caso su máximo de formación de  $ett-lf$  y consiguientemente su máximo valor de porosidad correspondiente, los poros de las probetas deberán comenzar muy lentamente a colmatarse, ya para entonces y muy posiblemente, por productos resultantes de su hidratación selenitosa ulterior de efectos muy diferentes a los anteriores citados, y similar a como ocurren,

- en su cemento portland matriz P ó PY solo, ó aunque como se ha dicho mas tardíamente,
- en aquellos otros cementos PA y PUZ preparados con estas puzolanas D ó N y cemento portland matriz PY, en cuyo caso el aumento-disminución de los valores de dicho parámetro en sus probetas respectivas y a lo largo del ensayo, deberá ser escaso y al menos bastante menor a cuando el mismo fué un P en lugar de dicho PY, como así ha ocurrido en este trabajo.

Por lo tanto y según lo anterior, la ettringita originada tanto en estos cementos de mezcla anteriores, como en sus cementos portland matrices P ó PY respectivos, es mayoritariamente de origen  $C_3A$ , o sea,  $ett-lf$ , en ambos casos, aunque su Vf sea menor quizás en aquellos que en estos últimos, por causa del impedimento provocado por la preseencia de este tipo de puzolanas D y N con los mismos y su comportamiento "anti-sulfato" tan específico, característico y opuesto a la formación de aquella.

Por último aquí cabe decir también otro tanto sobre el comporta-

miento expansor y colmatante, ó no, según la edad del ensayo, de la ett-lf, al igual que en el apartado correspondiente a los cementos portland matrices respectivos solos.

De la discusión 2\* (G): Puesto que el añadirle este tipo de puzolana D ó N, a cualquier cemento portland, equivale a añadirle "estuches vacíos" ó "huecos", lógicamente la porosidad del nuevo sistema habrá de aumentar con la adición de aquella y consiguientemente la diferencia con la de su cemento portland matriz acompañante respectivo solo. No obstante y puesto que según la interpretación anterior, a mas  $C_3A$  posea éste mayor cantidad de ett-lf expansiva-colmatante deberá formar, lógicamente la porosidad de sus probetas, a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, deberá disminuir con el aumento de tal contenido del mismo y de este modo la diferencia con la de su cemento portland matriz acompañante respectivo solo; y ocurriéndole por tanto a los valores de la Vu, todo lo contrario, como así ha ocurrido en este trabajo. Además y consiguientemente, los valores de RMF y RMC respectivos deberán aumentar, como así también ha ocurrido en este trabajo, ver Tablas n° 35,36,37,38,39,42,43 44,45 y 46.

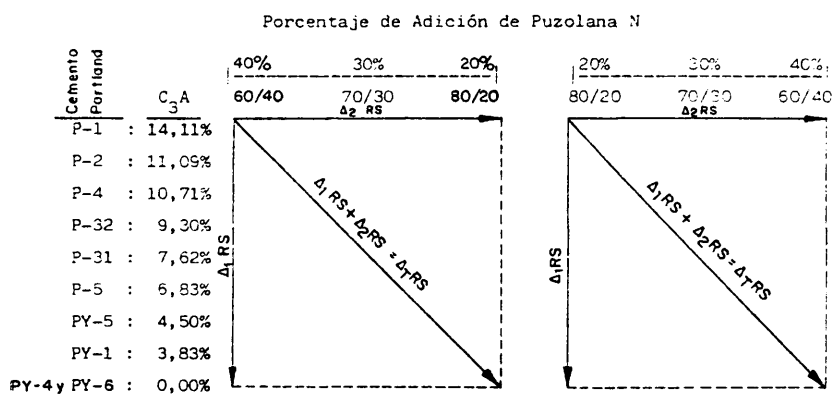
Por otra parte, lo anterior demuestra una vez mas que la Vf de los geles  $CSH_{SiO_2}^r$  de la puzolana D ó N debe ser muy superior a la de los de origen  $C_3S$  y/o  $C_2S$  (ya no quizás tan geles como sí cristales) de la fracción P ó PY correspondiente, y si la de aquellos es algo inferior a la de la ett-lf, la de éstos deberá serlo bastante; y si así no fuere no se colmatarían más aquellas probetas de mortero de los mismos solos que mas  $C_3A$  tuvieran, como ha ocurrido en este trabajo, véase Tablas 28, 38 y 45. , puesto que aquellos de origen  $C_3S$  y/o  $C_2S$  en exclusiva, lo impedirían, hecho que al parecer y por los resultados experimentales obtenidos citados, no puede llegar a ocurrir.

Y antes de finalizar cabe destacar el hecho notable de que pese a la gran porosidad mostrada por las probetas de mortero preparadas con estos cementos PA y PUZ de puzolana D ó N, favorable per se en principio a su autocolmatación por geles  $CSH_{SiO_2}^r$  de tales puzolanas mediante el mecanismo de through-solution, aquella no se minimiza con tendencia muy notable (mas bien pequeña ó escasa), hacia su nulidad, sino que muy al contrario permanece sinuosa y notablemente como casi al principio durante todo el ensayo, lo cual evidencia que tal mecanismo integral no debe ser el existente,

sino mas bien, quizás el del tipo compartimental resultante de la distribución al azar y uniforme de dicha puzolana D ó N por toda la masa del mortero de la probeta.

Por último al ser obvia la interpretación del resto de las discusiones de estos parámetros Porosidad y  $V_u$ , no es necesario su exposición, aunque no obstante las mismas quedan interpretadas en alguna(s) de las correspondientes a los demás parámetros de estas puzolanas D y N.

En definitiva, que del compendio global de toda esta interpretación se comprende como en este caso la mejora o aumento de la RS proporcionada por esta puzolana N, es, por lo general, diferente en cuantía según el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz acompañante correspondiente, de tal modo que, a diferencia con la silfícica D, sigue cualitativamente, según la edad del ensayo que se considere, el sentido de las resultantes de los dos vectores siguientes:



hasta la edad de 60, 90 ó 120 días (caso 545 días)

desde la edad de 60, 90 ó 120 días hasta 730 días.

A continuación vale aquí íntegramente y con mayor razón, el párrafo final de la interpretación VIII.2.2.2.1 (E).

VIII. 2.2.2.3.- Cementos de mezcla preparados con la Puzolana Referencial  
Alumínica M,

Discusión VIII. 2.2.2.3.

(E).- Parámetros:  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$ , véase Tabla 48 y 26.

1ª.- Sea cual fuere el cemento de mezcla de que se trate, la creación y evolución de los valores del  $\bar{\Delta L}$  de sus probetas respectivas, ha sido de gran valor absoluto a la primera edad, 7 días del ensayo, aunque también de constancia prácticamente total, desde la misma hasta la final de áquel. Y respecto del parámetro derivado,  $V_{cl}$ , se puede decir otro tanto a lo dicho en la discusión correspondiente a la puzolana D y N, con la notable diferencia de que lógicamente en este caso, la disminución de los valores del mismo desde la edad de 7 a la de 14 días, es mucho más rápida, notable y brusca, pudiéndose decir por tanto con mayor razón en todos estos casos de la puzolana M, que el valor máximo de este parámetro, se alcanza en los primeros 7 días de edad del ensayo, siendo los restantes tanto más despreciables cuanto mayor ha sido el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante correspondiente y viceversa. Y todo ello a diferencia a como ocurriese con este último solo.

2ª.- A la edad de 7 días se cumple, por lo general, que en todas las familias de cementos de mezcla PA y PUZ preparados con esta puzolana M y agua de amasado d o c, los valores del  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  de sus probetas respectivas aumentan con la cantidad de puzolana M añadida, siendo en cualquier caso tal aumento superior,

- al de las de las probetas hechas con su cemento portland matriz respectivo P o PY, solo, y por tanto,
- al porcentaje del  $\bar{\Delta L}$  que le debería corresponder en el supuesto de que dicha puzolana M actuase únicamente como un  $INERTE_{RS}$  y no como tal puzolana, manteniéndose tales generalidades últimas -más la segunda que la primera y dentro de aquella más en la 60/40 que en la 80/20 pasando por la 70/30, hermanas- tanto más tiempo cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  de áquel, P o PY, y viceversa, y verificándose, o no (en escasas ocasiones), todo lo contrario, desde tales edades de incumplimiento de dichas generalidades citadas, hasta la edad final del ensayo, es decir,

$\Delta \bar{L}$ < Vcell <	P-nº o PY-nº con C <sub>3</sub> A/M; 100/00 < 80/20 < 70/30 < 60/40	h. X <sub>1</sub> d.
	P-nº o PY-nº con C <sub>3</sub> A/M; 80/20 < 70/30 < 60/40 < 100/00 Y a menor contenido de C <sub>3</sub> A, la posición del 100/00 se va desplazando de lugar hacia la izquierda.	X <sub>1</sub> a 730 d

$\Delta \bar{L}$ < Vcell <	PY-4 ó PY-6/M; 100/00 < 80/20 < 70/30 < 60/40	p. f. c.
-------------------------------	---	----------

80% $\Delta \bar{L}$ P-nº o PY-nº con C <sub>3</sub> A < $\Delta \bar{L}$ P-nº o PY-nº con C <sub>3</sub> A/M 80/20	h. X <sub>2</sub> d.
80% $\Delta \bar{L}$ P-nº o PY-nº con C <sub>3</sub> A > $\Delta \bar{L}$ P-nº o PY-nº con C <sub>3</sub> A/M 80/20	X <sub>2</sub> a 730 d
70% $\Delta \bar{L}$ P-nº < $\Delta \bar{L}$ P-nº/M 70/30	h. X <sub>3</sub> d.
70% $\Delta \bar{L}$ P-nº > $\Delta \bar{L}$ P-nº/M 70/30	X <sub>3</sub> a 730 d
60% $\Delta \bar{L}$ P-nº < $\Delta \bar{L}$ P-nº/M 60/40	h. X <sub>4</sub> d.
60% $\Delta \bar{L}$ P-nº > $\Delta \bar{L}$ P-nº/M 60/40	X <sub>4</sub> a 730 d

Siendo:

- X<sub>1</sub> días, de la edad de 7 a la edad de 14 ó 28 días, si el contenido de C<sub>3</sub>A del cemento P-nº, está comprendido entre el 14,11% y el 11,09%.
- X<sub>1</sub> días de la edad de 28 a la edad de 60 días, si el contenido de C<sub>3</sub>A del cemento P-nº está comprendido entre el 10,71% y el 7,62%, ó
- X<sub>1</sub> días, de la edad de 60 a la edad de 180 días, si el contenido de C<sub>3</sub>A del cemento P-nº o PY-nº está comprendido entre el 6,83% y el 3,83%, y
- X<sub>1</sub> días < X<sub>2</sub> días < X<sub>3</sub> días ≤ X<sub>4</sub> días.

Por lo tanto y en cualquier caso se puede decir con fundamento que impera el efecto químico directo de la sustitución física de cemento P o PY por puzolanas M.

Finalmente se debe de recordar que, en esta discusión global, se basa la relativa similitud, en la forma que no en su cuantía, de la puzolana silícica N y la aluminica M, o mejor de las  $Al_2O_3^P$  respectivas, en favor, claro está, de la de esta última.



3ª.- Se ha de destacar el que sólo entre las familias de cementos de mezcla PA y PUZ, P-4/M, P-32/M, P-31/M, P-5/M, PY-5/M, PY-1/M, PY-4/M y PY-6/M, se cumpla de forma aproximada que por lo general, a igualdad de edad inicial, que no final, cemento de mezcla y agua de amasado  $\frac{a}{c}$  o  $\frac{d}{c}$ , el  $\bar{\Delta L}$  de sus probetas respectivas disminuya con el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante respectivo, al igual que ocurriere,

- en todos los casos y edades del ensayo, con la puzolana D, y
- en todos los casos y excepto la(s) edad(es) inicial(es), con la puzolana N,

siendo de extrañar notablemente el que en dicha generalidad no queden incluidas las familias P-1/M y P-2/M, la primera por "defecto" y la segunda por "exceso" en los valores del  $\bar{\Delta L}$  alcanzados.

4ª.- Igualmente se ha de destacar el hecho de que si bien el  $\bar{\Delta L}$  de las probetas de todos y cada uno de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con esta puzolana M superan, por lo general, el límite de  $\bar{\Delta L}$  máximo permisible a la edad de 14 días y empleado actualmente para los cementos PY (tipo V, USA), en exclusiva, del 0,040%, según la norma ASTM C 150-84 a (6), y del 0,059% a la edad de 28 días (0,054%, según la propuesta razonada surgida de este trabajo y que se verá más adelante), empleado antaño para idéntico fin, no ocurre otro tanto, sino todo lo contrario, con el correspondiente valor del  $\bar{\Delta L}$  a la edad de 365 días, es decir,

$\bar{\Delta L}$	$\bar{\Delta L}$ P-nº ó PY-nº/M 80/20, 70/30 y 60/40 > 0,040%	a 14 d.
	$\bar{\Delta L}$ P-nº ó PY-nº/M 80/20, 70/30 y 60/40 > 0,054%	a 28 d.
	$\bar{\Delta L}$ P-nº ó PY-nº/M 80/20, 70/30 y 60/40 < 0,160%	a 365 d.

5ª.- Del mismo modo se ha de destacar también que en el caso de las familias de cementos de mezcla PA y PUZ, PY-4/M y PY-6/M, así ensayadas, y comparadas entre si, a igualdad de edad, cemento de mezcla y agua de amasado  $\frac{a}{c}$  o  $\frac{d}{c}$ , ocurre todo lo contrario y con mayor diferencia que en igual comparación verificada con la puzolana D o N, es decir,

$> \bar{\Delta L} >$	PY-4/M 80/20 ó 70/30 ó 60/40 > PY-6/M 80/20 ó 70/30 ó 60/40	p.f.e.
----------------------	---	--------

6ª.- En general todo lo discutido hasta ahora es totalmente, válido para ambos tipos de probetas, las confeccionadas con  $\frac{a}{c} = d$  y las confeccionadas con  $\frac{a}{c} = c$ . No obstante de los 30 cementos de mezcla preparados con

la puzolana M y así ensayados, 19 amasados con  $\frac{a}{c} = c$  originaron unos  $\bar{\Delta}L$  en sus probetas mayores que con  $\frac{a}{c} = d$ , y los 11 restantes al contrario.

Por otra parte, se ha de destacar que en las familias donde sus tres cementos de mezcla han tenido una relación,

-  $\frac{a}{c} = c$ , su cemento portland matriz conformante correspondiente sólo tiene una superficie específica Blaine muy próxima o superior a 3.200 cm<sup>2</sup>/g, caso del P-1, P-31, PY-1 y PY-6, o

-  $\frac{a}{c} = d$ , su cemento portland matriz conformante correspondiente sólo tiene una superficie específica Blaine ligeramente superior a 3.000 cm<sup>2</sup>/g, caso del P-2, P-4 y PY-5,

y en las restantes familias de cementos de mezcla en las que la superficie específica de su cemento portland matriz conformante correspondiente ha estado comprendida entre los dos valores anteriores citados ha habido heterogeneidad en la relación  $\frac{a}{c}$ .

7.- En los casos del empleo de esta puzolana M, la relación  $\frac{a}{c} = d \pm$  cte. osciló siempre entre 0,54 y 0,63, causa por la cual no se originó problema alguno en la trabajabilidad de sus morteros correspondientes.

8.- De los 60 cementos de mezcla PA y PUZ preparados con esta puzolana referencial aluminica M, y así ensayados,

- 2 (3,33%), han resultado ser de moderada RS, puesto que  $0,054\% < \bar{\Delta}L_{28d} < 0,073\%$ , según la Tabla 31 y la parte final de la interpretación VIII.2.2.1., y mientras que,

- 58 (96,66%) resultaron ser de baja o escasa RS, puesto que el  $\bar{\Delta}L_{28d} > 0,073\%$ , según las referencias anteriores.

Discusión VIII.2.2.2.3 (cont.)

(F) Parámetros : RMF, RMC,  $\Delta$ RMF,  $\Delta$ RMC,  $V_c\Delta$ RMF y  $V_c\Delta$ RMC, véase Tablas 49, 50, 51, 28 y 29.

- 1<sup>a</sup>. - En general, sea cual fuere el cemento de mezcla PA y PUZ preparado con esta puzolana M y así ensayado, la evolución de los valores de los parámetros RMF, RMC,  $\Delta$ RMF,  $\Delta$ RMC,  $V_c\Delta$ RMF y  $V_c\Delta$ RMC de sus probetas respectivas ha sido,
- en el caso de los dos primeros, RMC y RMF, de aumento rápido y notable, seguido de otro menor con o sin sinuosidad diversa, hasta alcanzar un valor máximo a edades del ensayo comprendidas entre la de 90 y 730 días, pero escasamente a esta última, es decir, similar a como ocurriere en su cemento portland matriz conformante respectivo solo, aunque con sinuosidad distinta en periodo y valores absolutos,
  - en el caso de los dos segundos,  $\Delta$ RMF e  $\Delta$ RMC, de aumento más o menos sinuoso hasta alcanzar un valor máximo, más pronto o más tarde, y similar básicamente con el de su cemento portland matriz acompañante respectivo P o PY solo, aunque algo más en el  $\Delta$ RMC que en el  $\Delta$ RMF, y
  - en el caso de los dos terceros,  $V_c\Delta$ RMF y  $V_c\Delta$ RMC, de disminución rápida y progresiva, de modo y manera que los mayores valores de los mismos se alcanzan en todos los casos durante los primeros 28 días del ensayo, y más concretamente durante los primeros 7 días, a cuya edad son de tal magnitud, que los del resto de las edades del ensayo se pueden considerar despreciables en comparación con los mismos; a diferencia todo ello a como y cuanto ocurriere a igual edad en sus cementos portland matrices acompañantes respectivos P ó PY solos.

Discusión VIII.2.2.2.3. (cont.)

2\*.- Por lo general en casi todas las familias de cementos de mezcla PA y PUZ preparadas con esta puzolana M y así ensayadas (excepto en RMF la P-2/M), se cumple:

2\*1. A la edad de 1 día: Que los valores de las RMF y RMC de sus probetas respectivas son casi siempre bastante menores que los correspondientes a los de su cemento portland matriz constitutivo, P ó PY, solo (y en casi todos los casos menores que su porcentaje correspondiente en el supuesto de que dicha puzolana M únicamente actuase como un INERTE<sub>RM</sub>), aumentando tal diferencia,

- en valor absoluto, es decir a igualdad de familia de cementos de mezcla, conforme aumenta la adición de puzolana M a aquél, y viceversa, en cuyo caso, presencia en exclusiva de aquél P ó PY solo, tales valores son los mayores de todos (excepto en el caso de la excepción anterior citada); por lo tanto, y a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, tal diferencia ha resultado ser mayor aún respecto a la del porcentaje de los valores de RMF<sub>id.</sub> y RMC<sub>id.</sub> de las probetas de aquél P ó PY solo, en el supuesto de que tal puzolana M únicamente actuase como un INERTE<sub>RM</sub> real, es decir,

RMF	P-n* ó PY-n*/M; $X_1 100/00 > X_2 80/20 > X_3 70/30 > X_4 60/40$	a 1 día
> ó >		
RMC	$80\% de X_1 > 70\% de X_1 > 60\% de X_1$	

- en valor relativo, es decir, a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, conforme aumenta el contenido de - - C<sub>3</sub>A de aquél, es decir,

RMF	P-n*/M 80/20 ó 70/30 ó 60/40 > PY-n*/M 80/20 ó 70/30 ó 60/40	p.f.e.
> ó >		
RMC		

2\*2. A las edades fundamentales del ensayo de 7 a 28 días: Ocurre exactamente todo lo contrario al caso anterior, excepto lo concerniente al aumento de la diferencia en valor relativo, pues como decimos en valor absoluto aumenta la diferencia, respecto al de su cemento portland matriz acompañante respectivo, con la adición de puzolana M,

siempre y cuando el mismo sea de mediano a prácticamente nulo contenido de  $C_3A$ , en este caso el P-31, P-5, PY-5 PY-1, PY-4 y PY-6, pero no el P-1, P-2, P-4 y P-31, con los que no se cumple la generalidad citada a edad alguna del ensayo, y si únicamente que los valores de las RMC, y algunos de las RMF, de sus cementos de mezcla PUZ 70/30 respectivos, quedan intermedios entre los correspondientes a los de sus hermanos 80/20 y 60/40, respectivamente; siendo además dicho aumento de signo contrario al de la edad de 1 día, por lo que a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, tal diferencia ha resultado ser mayor aún respecto a la del porcentaje de los valores de RMF<sub>7-28d.</sub> y RMC<sub>7-28d.</sub>, de las probetas de aquél P ó PY sólo, en el supuesto de que la puzolana M únicamente actuase como un INERTE<sub>py</sub> real, es decir,

RMF ó RMC	P-nº ó PY-nº/M; $X_1 100/00 < X_2 80/20 < X_3 70/30 < X_4 60/40$	de 7 a 14 días a
	$80\% de X_1 > 70\% de X_2 > 60\% de X_3$	de 15 a 28 días

- mientras que en valor relativo, es decir, a igualdad de cemento de mezcla, lo que ocurre es que, a igualdad de cemento de mezcla,

- . 80/20, tal diferencia por lo general aumenta.
- . 60/40, tal diferencia por lo general disminuye (excepto en el caso del PY-6), y
- . 70/30, situaciones intermedias a ambas anteriores,

con el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante respectivo, es decir,

RMF ó RMC	P-nº/M 80/20 > PY-nº/M 80/20	de 7 a 28 días
	P-nº/M 60/40 < PY-nº/M 60/40 (PY-1 y PY-4, no PY-6)	= de 7 a 28 días
	P-nº/M 70/30 > PY-nº/M 60/40	de 7 a 28 días

Y todo ello concretado a la edad de 7 días, da por resultado lo siguiente:

RMF ó RMC	P-1, P-2, P-4, P-32 ó P-31/M; 80/20 70/30 60/40	a 7 días
	$\begin{matrix} \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \end{matrix}$	
	P-5, PY-1, PY-4 ó PY-6/M ; 80/20 70/30 60/40	

Y en cuanto a los parámetros derivados correspondientes,  $\Delta RMF$ ,  $\Delta RMC$ ,  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$ , se puede decir que los mismos aumentan en todos los casos con la adición de puzolana M, siendo además y en casi todos ellos y edades del ensayo, aunque para las Vc respectivas principalmente sólo a la de 7 días, de la mitad al doble de veces mayor que el correspondiente a las probetas de su cemento portland matriz acompañante respectivo P ó PY solo, y potencialmente mayor aún en  $\Delta RMF$  que en  $\Delta RMC$ , cuanto mas temprana es la edad del ensayo; y todo ello de modo y manera que resultan ser siempre,

- menores, cuando el cemento portland matriz acompañante respectivo tiene mucho ó poco  $C_3A$ , a cuando no tiene prácticamente nada de  $C_3A$ , y
- mayores, por este orden, a los de este último, aumentando tal mayoría con la adición de puzolana M.

2<sup>o</sup>.3. A la edad de 730 días ocurre,

- lo mismo que en el caso anterior 2<sup>o</sup>.2., para los valores de RMF de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ de cemento portland matriz acompañante P de contenido mediano a elevado de  $C_3A$ ,
- lo contrario que en el caso anterior 2<sup>o</sup>.2., para los valores de RMC, y
- prácticamente lo contrario al caso anterior 2<sup>o</sup>.2., para los valores de RMF y RMC de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ de cemento portland matriz acompañante PY de contenido escaso a prácticamente nulo de  $C_3A$ .

Discusión VIII.2.2.2.3. (cont.)

(G) Parámetro : Porosidad, véase Tablas 52 y 28.

1<sup>o</sup>.- Sea cual fuere el cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con esta puzolana M y así ensayado, la evolución del contenido de poros de sus probetas respectivas varía a lo largo del ensayo con sinuosidad irregular no semejante de uno a otro cemento de mezcla, y de periodo constantemente variable durante el mismo, resultando que en todos ellos se alcanza, entre otros, un valor máximo mayor y mínimo menor de porosidad, de edad de consecución diferente de un cemento de mezcla a otro, aún entre los miembros de una misma familia, tras

el cual, disminuye lentamente hasta antes de la edad final del ensayo, si el cemento portland matriz acompañante es de mediano a elevado contenido de  $C_3A$ , y hasta la propia edad final, en caso contrario.

Siendo destacable que tal sinuosidad irregular citada, no guarda prácticamente relación alguna con la de los 12 cementos portland, 6 P y 6 PY, matrices solos, ni con la de los cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes a la puzolana D, que no la N; de aquí que los mínimos valores de porosidad alcanzados, en su caso, a las edades iniciales del ensayo, no suelen corresponderse con los menores de todos ellos alcanzados durante el mismo, como ocurrió con aquellos, y aumentando por lo general la edad de su consecución entre los miembros de una misma familia, conforme aumenta el contenido de puzolana M de los mismos y el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland conformante común ha sido de mediano a elevado contenido de  $C_3A$ .

2ª.- Sea cual fuere la familia de cementos de mezcla PA ó PUZ preparada con esta puzolana M, a igualdad de edad se cumple que el contenido de poros de sus probetas respectivas es, por lo general, mayor que el correspondiente al de las probetas de su cemento portland matriz constitutivo P ó PY solo, aumentando tal diferencia,

- en valor absoluto, es decir a igualdad de familia de cementos de mezcla, conforme aumenta la cantidad de puzolana M añadida a aquél, es decir,

< Poros <	P-nº ó PY-nº/M ; 100/00 <	80/20 < 70/30 < 60/40	p.f.e.
-----------	---------------------------	-----------------------	--------

- en valor relativo, es decir a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, conforme disminuye el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz conformante respectivo, es decir,

$$[\text{Poros P-1/M } 80/20 \text{ ó } 70/30 \text{ ó } 60/40 - \text{Poros P-1}] < [\text{Poros P-2/M } 80/20 \text{ ó } 70/30 \text{ ó } 60/40 - \text{Poros P-2}] < \dots < [\text{Poros PY-1/M } 80/20 \text{ ó } 70/30 \text{ ó } 60/40 - \text{poros PY-1}] < [\text{Poros PY-6/M } 80/20 \text{ ó } 70/30 \text{ ó } 60/40 - \text{Poros PY-6}]$$

aunque todo ello con escasa diferencia de uno a otro.

#### Discusión VIII.2.2.2.3. (cont.)

(H) Parámetros : Vu,  $\Delta Vu$  y  $Vc \Delta Vu$ , véase Tablas 52, 53, 28 y 30.

1ª.- Sea cual fuere el cemento de mezcla preparado con esta puzolana M y así ensayado, la evolución de los valores de los parámetros

$V_u$ ,  $\Delta V_u$  y  $V_c \Delta V_u$  de sus probetas respectivas, es

- en el caso del primero,  $V_u$ , y en las familias de cementos de mezcla de cemento portland matriz acompañante,
  - . de alto ó mediano contenido de  $C_3A$ , caso del P-1, P-2, P-4, P-32 y P-31, de aumento constante, sinuoso ó no, hasta la edad de 545 días, seguido de una ligera disminución a la edad final del ensayo, y
  - . de mediano, bajo, escaso ó prácticamente nulo de  $C_3A$ , caso del P-5, PY-1, PY-4 y PY-6, de aumento constante hasta la edad final del ensayo,
- en el caso del segundo  $\Delta V_u$ , de aumento más o menos sinuoso hasta la edad final del ensayo, con o sin una disminución a la edad de 545 días, pero siendo el mismo siempre y en todos los casos muy notable a la edad de 7 días, y
- en el caso del tercero  $V_c \Delta V_u$ , de disminución por lo general,
  - . notable, durante las edades iniciales e intermedias del ensayo, y
  - . escaso y prácticamente nulo, durante las restantes hasta el final del mismo.

Y todo ello a diferencia de lo que ocurriere con sus cementos portland matrices acompañantes respectivos solos, en los que tales procesos transcurren más lentamente.

2º.- Por lo general sea cual fuere la familia de cementos de mezcla PA y PUZ preparados con esta puzolana M y así ensayados se cumple en sus probetas respectivas que los valores del parámetro,

- $V_u$ , disminuyen,
- $\Delta V_u$ , aumentan en la mayoría de los casos, y
- $V_c \Delta V_u$  aumentan en la mayoría de los casos (principalmente a las edades de 7 y 14 días),

con la adición de puzolana M, siendo por lo general,

- en el primer parámetro,  $V_u$ , casi siempre superior a la de las probetas de su cemento portland matriz acompañante correspondiente solo, en especial los 80/20 y 70/30, que no su hermano menor 60/40, al que le ocurre comúnmente todo lo contrario, es decir

> $V_u$ >	P-nº ó PY-nº/M ; 100/00 > 80/20 > 70/30 > 60/40
-----------	---

- en el segundo parámetro,  $\Delta V_u$ , casi siempre superior al de las probetas de su cemento portland matriz acompañante correspondiente solo, en especial los 70/30 y 60/40, y algunos 80/20



- hermanos, que no todos, y
- en el tercer parámetro  $Vc/Vu$  lo mismo que en el caso anterior.

Discusión VIII.2.2.2.3. (cont.)

(I) Parámetros :  $SO_4^{=}$  lcp y Vv, véase Tablas 54 y 30.

- 1ª.- Sea cual fuere el cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con esta puzolana M y así ensayado, la evolución de los valores de los parámetros  $SO_4^{=}$  lcp y Vv de sus probetas respectivas, es de disminución muy brusca y por tanto notable desde la edad de 7 a la de 14 días del ensayo, siendo, por lo general, tanto más brusca y notable cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante respectivo, y viceversa, hasta llegar a la práctica nulidad del mismo. Y todo ello,
- al igual que ocurriere con su cemento portland matriz acompañante correspondiente, si el mismo es de mediano a elevado contenido de  $C_3A$ , caso del P-1, P-2, P-4, P-32, P-31 y P-5 respectivamente, y
  - a diferencia de lo que ocurriere, con su cemento portland matriz acompañante correspondiente, si el mismo es de escaso a prácticamente nulo contenido de  $C_3A$ , caso del PY-5, PY-1, PY-4 y PY-6, respectivamente.

No obstante y pese a todo lo cual lo verdaderamente interesante es que tanto el mayor valor absoluto como el relativo (respecto del total) del parámetro Vv se verifica en todos los casos durante los primeros 28 días del ensayo, y dentro de los mismos, por lo general, tanto más pronto, durante los primeros 7 ó 14 días inclusive, cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante respectivo y viceversa.

- 2ª.- Por lo general, sea cual fuere la familia de cementos de mezcla PA y PUZ preparada con esta puzolana M, y así ensayada, a igualdad de edad se cumple que la cantidad de  $SO_4^{=}$  lcp respectivas es bastante menor que la de los correspondientes a su cemento portland matriz acompañante común P ó PY solo, aumentando la diferencia,
- en valor absoluto, es decir, a igualdad de familia de cementos de mezcla, conforme aumenta la adición de puzolana M a áquel, y viceversa, en cuyo caso más extremo posible ó presencia en exclusiva de cemento portland matriz acompañante respectivo solo, tal cantidad de  $SO_4^{=}$  lcp es la mayor de todas; por lo tanto y en tal circunstancia dicha diferencia será mayor aún respecto a la del porcentaje de la cantidad de  $SO_4^{=}$  lcp, de

áquel P ó PY solo, en el supuesto de que tal puzolana M únicamente actuase como un INERTE<sub>RS</sub> integral, es decir

$> S_{41cp} =$	P-nº ó PY-nº - P-nº ó PY-nº/M 60/40 > P-nº ó PY-nº - P-nº ó PY-nº/M 70/30 > P-nº ó PY-nº/M 80/20	p.f.e.
	P-nº ó PY-nº/M ; $X_1$ 100/00 > $X_2$ 80/20 > $X_3$ 70/30 > $X_4$ 60/40 $\wedge$ $\wedge$ $\wedge$ 80% $X_1$ 70% $X_1$ 60% $X_1$	

- en valor relativo, es decir, a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, conforme aumenta el contenido de C<sub>3</sub>A de áquel, y a la edad del ensayo considerada, es decir,

$> S_{41cp} =$	P-nº-P-nº/M 80/20 ó 70/30 ó 60/40 > PY-nº-PY-nº/M 80/20 ó 70/30 ó 60/40	> a menos edad < a mas edad
	PY-nº/M 80/20 ó 70/30 ó 60/40 > P-nº/M 80/20 ó 70/30 ó 60/40	p.f.e.

3ª.- A igualdad de edad del ensayo y cemento de mezcla se produce por lo general que el valor de este parámetro V<sub>w</sub> aumenta durante los primeros 21 ó 28 días, según los casos, con el contenido de C<sub>3</sub>A del cemento portland matriz acompañante, y ocurriendo lógicamente todo lo contrario con los parámetros derivados correspondientes.

Este hecho se destaca muy claramente comparando los correspondientes cementos de mezcla de las familias P-1/M, PY-4/M y PY-6/m, donde la generalidad denunciada se cumple hasta la edad de 21 días entre el primero y el segundo y hasta la edad de 28 días entre el primero y el tercero.

Antes de entrar en la interpretación de este apartado se ha de hacer constar que dados los valores obtenidos de los distintos parámetros se ha creído conveniente realizar aquella de forma agrupada y/o individualizada según los casos.

#### Interpretación VIII.2.2.3(E)(F)

Antes de entrar en la interpretación de los valores obtenidos de estos parámetros,  $\bar{\Delta}L$ , RMF y RMC se ha de hacer constar que el desarrollo de la misma se realizará conforme al orden de las discusiones correspondientes al parámetro  $\bar{\Delta}L$ , incrustando en ellas las correspondientes a los parámetros RMF y RMC cuando se juzgue oportuno. Así pues, se tiene :



a) tipo de probeta: 1x1x6 cm ASTM C 452-68

As dimensões (medidas) do produto:  $14 \times 6$  cm ASTM C 452-80  
 As propriedades (medidas) do mesmo: RMF e RMC ( $\text{kg/cm}^2$ )

**TABLA 49**

**Fotografia(s)/correspondente(s) e data**

Team - WALLS

[illegible]

Air Force Security Program - 1-6 am 45 FM C 487-6

\* Parâmetro(s) medido(s) em: Caudal de SP<sup>1</sup> (m<sup>3</sup>/s) e V<sub>1</sub> (m/dia)

TABLE 54

REF ID: A61072

Table: N213

CIMENTO P-1 /PUZOLANA M										CIMENTO P-2 /PUZOLANA M										CIMENTO P-4 /PUZOLANA M										CIMENTO P-32/PUZOLANA M										CIMENTO P-31/PUZOLANA M																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
ESQ	10	20	30	40	50	60	70	80	90	ESQ	10	20	30	40	50	60	70	80	90	ESQ	10	20	30	40	50	60	70	80	90	ESQ	10	20	30	40	50	60	70	80	90	ESQ	10	20	30	40	50	60	70	80	90																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
1040	CEMENTO P-1 /PUZOLANA M										CEMENTO P-2 /PUZOLANA M										CEMENTO P-4 /PUZOLANA M										CEMENTO P-32/PUZOLANA M										CEMENTO P-31/PUZOLANA M																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
1640	80/20 70/30 60/40										80/20 70/30 60/40										80/20 70/30 60/40										80/20 70/30 60/40										80/20 70/30 60/40																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
7	212,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9	17,3	13,3	15,1	19,5	11,0	124,7	2,4	75,3	17,5	7,2	1,6	108,5	15,3	41,8	14,3	26,7	12,8	111,3	15,9	12,2	14,5	20,7	13,0	114,3	19,8	13,2	15,5	19,2	11,5	118,9

parametro(s) no(s) em uso:  $\alpha = 0.05$  e  $VC_{RAM} = VC(\%) / \alpha$

TABLE 50

Torre Verde

ID#	CEMENTO P-1 /PUZOLANA I			CEMENTO P-2 /PUZOLANA I			CEMENTO P-4 /PUZOLANA I			CEMENTO P-32/PUZOLANA III			CEMENTO P-31/PUZOLANA III					
	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40			
	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC			
7	27.138.08	32.41.34.46	39.64.4	44.55.2	24.37.29.3	37.41.17.3	44.02.12.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
14	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
21	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
28	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
40	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
50	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
60	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
70	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
80	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
90	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
100	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
110	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
120	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
130	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
140	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
150	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
160	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
170	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
180	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
190	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
200	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
210	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
220	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
230	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
240	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
250	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
260	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
270	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
280	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
290	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
300	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
310	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
320	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
330	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
340	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
350	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
360	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
370	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
380	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
390	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
400	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
410	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
420	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
430	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
440	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
450	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
460	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.02.14.02.17.41.3	37.31	72.37	44.19.42.1	42.82.34	34.31.28.37	41.29	40.2	58.17.23.5	78.28	28.64.42.51	34.24.3
470	31.31.37	37.27.31.4	37.37.27.4	37.37.27.4	42.51.23.4	4.41	14.0											

e) Parámetro(s) medido(s) en la mezcla:  $\Delta RNC(\%)$ ,  $VC\Delta RNC = V\Delta RNC(\%/dis)$

**TABLA 5**

T-0040 - N-4424

(34)	CEMENTO P-1/PUZOLANA M				CEMENTO P-1/PUZOLANA M				CEMENTO P-4/PUZOLANA M				CEMENTO P-32/PUZOLANA M				CEMENTO P-33/PUZOLANA M			
	80/20	70/30	60/40		80/20	70/30	60/40		80/20	70/30	60/40		80/20	70/30	60/40		80/20	70/30	60/40	
7	177.4	25.37	182.8	45.59	194.2	41.00	198.2	37.33	197.8	44.25	203.3	33.30	205.0	35.26	207.9	37.98	208.9	37.98	212.2	35.77
2	245.2	2.44	246.9	0.21	244.2	2.74	240.5	1.77	239.3	2.21	235.2	1.11	234.1	2.42	229.9	1.21	228.7	2.44	224.2	0.21
24	254.7	1.24	256.4	0.49	244.5	2.34	244.7	0.29	243.3	2.40	240.5	1.41	239.3	1.41	237.9	1.63	236.8	1.63	235.2	1.63
62	259.7	0.27	260.1	0.48	248.5	1.58	246.7	1.77	243.9	1.30	240.5	0.92	238.9	0.92	237.4	1.05	236.3	1.05	234.7	1.05
90	264.7	0.54	264.8	0.74	254.5	1.33	252.7	1.53	250.9	1.24	247.3	0.82	245.2	0.82	243.6	0.94	242.4	0.94	240.8	0.94
120	270.4	2.74	272.1	0.21	265.9	2.18	262.4	1.78	258.3	1.28	254.2	2.30	250.1	1.28	247.9	1.11	246.8	1.11	244.6	1.11
150	276.1	1.34	274.9	0.01	269.6	0.74	267.8	0.94	265.9	1.05	263.9	0.21	261.9	0.21	259.9	0.54	257.9	0.54	255.9	0.54
180	281.7	0.51	280.5	0.49	274.4	0.24	272.4	0.74	270.4	0.74	268.4	0.24	266.4	0.24	264.4	0.54	262.4	0.54	260.4	0.54
210	287.3	0.31	286.1	0.39	279.4	0.24	277.4	0.54	275.4	0.54	273.4	0.24	271.4	0.24	269.4	0.54	267.4	0.54	265.4	0.54
240	292.9	0.44	291.6	0.44	283.4	0.22	281.4	0.42	279.4	0.42	277.4	0.22	275.4	0.22	273.4	0.54	271.4	0.54	269.4	0.54
270	298.5	0.24	297.3	0.24	289.4	0.12	287.4	0.32	285.4	0.32	283.4	0.12	281.4	0.12	279.4	0.44	277.4	0.44	275.4	0.44
300	304.1	0.24	302.9	0.24	294.4	0.12	292.4	0.32	290.4	0.32	288.4	0.12	286.4	0.12	284.4	0.44	282.4	0.44	280.4	0.44
330	309.7	0.24	308.5	0.24	299.4	0.12	297.4	0.32	295.4	0.32	293.4	0.12	291.4	0.12	289.4	0.44	287.4	0.44	285.4	0.44
360	315.3	0.24	314.1	0.24	304.4	0.12	302.4	0.32	300.4	0.32	298.4	0.12	296.4	0.12	294.4	0.44	292.4	0.44	290.4	0.44
390	320.9	0.24	319.7	0.24	309.4	0.12	307.4	0.32	305.4	0.32	303.4	0.12	301.4	0.12	299.4	0.44	297.4	0.44	295.4	0.44
420	326.5	0.24	325.3	0.24	315.4	0.12	313.4	0.32	311.4	0.32	309.4	0.12	307.4	0.12	305.4	0.44	303.4	0.44	301.4	0.44
450	332.1	0.24	330.9	0.24	321.4	0.12	319.4	0.32	317.4	0.32	315.4	0.12	313.4	0.12	311.4	0.44	309.4	0.44	307.4	0.44
480	337.7	0.24	336.5	0.24	326.4	0.12	324.4	0.32	322.4	0.32	320.4	0.12	318.4	0.12	316.4	0.44	314.4	0.44	312.4	0.44
510	343.3	0.24	342.1	0.24	331.4	0.12	329.4	0.32	327.4	0.32	325.4	0.12	323.4	0.12	321.4	0.44	319.4	0.44	317.4	0.44
540	348.9	0.24	347.7	0.24	336.4	0.12	334.4	0.32	332.4	0.32	330.4	0.12	328.4	0.12	326.4	0.44	324.4	0.44	322.4	0.44
570	354.5	0.24	353.3	0.24	341.4	0.12	339.4	0.32	337.4	0.32	335.4	0.12	333.4	0.12	331.4	0.44	329.4	0.44	327.4	0.44
600	360.1	0.24	358.9	0.24	346.4	0.12	344.4	0.32	342.4	0.32	340.4	0.12	338.4	0.12	336.4	0.44	334.4	0.44	332.4	0.44
630	365.7	0.24	364.5	0.24	351.4	0.12	349.4	0.32	347.4	0.32	345.4	0.12	343.4	0.12	341.4	0.44	339.4	0.44	337.4	0.44
660	371.3	0.24	370.1	0.24	356.4	0.12	354.4	0.32	352.4	0.32	350.4	0.12	348.4	0.12	346.4	0.44	344.4	0.44	342.4	0.44
690	376.9	0.24	375.7	0.24	361.4	0.12	359.4	0.32	357.4	0.32	355.4	0.12	353.4	0.12	351.4	0.44	349.4	0.44	347.4	0.44
720	382.5	0.24	381.3	0.24	366.4	0.12	364.4	0.32	362.4	0.32	360.4	0.12	358.4	0.12	356.4	0.44	354.4	0.44	352.4	0.44
750	388.1	0.24	386.9	0.24	371.4	0.12	369.4	0.32	367.4	0.32	365.4	0.12	363.4	0.12	361.4	0.44	359.4	0.44	357.4	0.44
780	393.7	0.24	392.5	0.24	376.4	0.12	374.4	0.32	372.4	0.32	370.4	0.12	368.4	0.12	366.4	0.44	364.4	0.44	362.4	0.44
810	399.3	0.24	398.1	0.24	381.4	0.12	379.4	0.32	377.4	0.32	375.4	0.12	373.4	0.12	371.4	0.44	369.4	0.44	367.4	0.44
840	404.9	0.24	403.7	0.24	386.4	0.12	384.4	0.32	382.4	0.32	380.4	0.12	378.4	0.12	376.4	0.44	374.4	0.44	372.4	0.44
870	410.5	0.24	409.3	0.24	391.4	0.12	389.4	0.32	387.4	0.32	385.4	0.12	383.4	0.12	381.4	0.44	379.4	0.44	377.4	0.44
900	416.1	0.24	414.9	0.24	396.4	0.12	394.4	0.32	392.4	0.32	390.4	0.12	388.4	0.12	386.4	0.44	384.4	0.44	382.4	0.44
930	421.7	0.24	420.5	0.24	401.4	0.12	399.4	0.32	397.4	0.32	395.4	0.12	393.4	0.12	391.4	0.44	389.4	0.44	387.4	0.44
960	427.3	0.24	426.1	0.24	406.4	0.12	404.4	0.32	402.4	0.32	400.4	0.12	398.4	0.12	396.4	0.44	394.4	0.44	392.4	0.44
990	432.9	0.24	431.7	0.24	411.4	0.12	409.4	0.32	407.4	0.32	405.4	0.12	403.4	0.12	401.4	0.44	399.4	0.44	397.4	0.44
1020	438.5	0.24	437.3	0.24	416.4	0.12	414.4	0.32	412.4	0.32	410.4	0.12	408.4	0.12	406.4	0.44	404.4	0.44	402.4	0.44
1050	444.1	0.24	442.9	0.24	421.4	0.12	419.4	0.32	417.4	0.32	415.4	0.12	413.4	0.12	411.4	0.44	409.4	0.44	407.4	0.44
1080	449.7	0.24	448.5	0.24	426.4	0.12	424.4	0.32	422.4	0.32	420.4	0.12	418.4	0.12	416.4	0.44	414.4	0.44	412.4	0.44
1110	455.3	0.24	454.1	0.24	431.4	0.12	429.4	0.32	427.4	0.32	425.4	0.12	423.4	0.12	421.4	0.44	419.4	0.44	417.4	0.44
1140	460.9	0.24	459.7	0.24	436.4	0.12	434.4	0.32	432.4	0.32	430.4	0.12	428.4	0.12	426.4	0.44	424.4	0.44	422.4	0.44
1170	466.5	0.24	465.3	0.24	441.4	0.12	439.4	0.32	437.4	0.32	435.4	0.12	433.4	0.12	431.4	0.44	429.4	0.44	427.4	0.44
1200	472.1	0.24	470.9	0.24	446.4	0.12	444.4	0.32	442.4	0.32	440.4	0.12	438.4	0.12	436.4	0.44	434.4	0.44	432.4	0.44
1230	477.7	0.24	476.5	0.24	451.4	0.12	449.4	0.32	447.4	0.32	445.4	0.12	443.4	0.12	441.4	0.44	439.4	0.44	437.4	0.44
1260	483.3	0.24	482.1	0.24	456.4	0.12	454.4	0.32	452.4	0.32	450.4	0.12	448.4	0.12	446.4	0.44	444.4	0.44	442.4	0.44
1290	488.9	0.24	487.7	0.24	461.4	0.12	459.4	0.32	457.4	0.32	455.4	0.12	453.4	0.12	451.4	0.44	449.4	0.44	447.4	0.44
1320	494.5	0.24	493.3	0.24	466.4	0.12	464.4	0.32	462.4	0.32	460.4	0.12	458.4	0.12	456.4	0.44	454.4	0.44	452.4	0.44
1350	500.1	0.24	498.9	0.24	471.4	0.12	469.4	0.32	467.4	0.32	465.4	0.12	463.4	0.12	461.4	0.44	459.4	0.44	457.4	0.44
1380	505.7	0.24	504.5	0.24	476.4	0.12	474.4	0.32	472.4	0.32	470.4	0.12	468.4	0.12	466.4	0.44	464.4	0.44	462.4	0.44
1410	511.3	0.24	510.1	0.24	481.4	0.12	479.4	0.32	477.4	0.32	475.4	0.12	473.4	0.12	471.4	0.44	469.4	0.44	467.4	0.44
1440	516.9	0.24	515.7	0.24	486.4	0.12	484.4	0.32	482.4	0.32	480.4	0.12	478.4	0.12	476.4	0.44	474.4	0.44	472.4	0.44
1470	522.5	0.24	521.3	0.24	491.4	0.12	489.4	0.32	487.4	0.32	485.4	0.12	483.4	0.12	481.4	0.44	479.4	0.44	477.4	0.44
1500	528.1	0.24	526.9	0.24	496.4	0.12	494.4	0.32	492.4	0.32	490.4	0.12	488.4	0.12	486.4	0.44	484.4	0.44	482.4	0.44
1530	533.7	0.24	532.5	0.24	501.4	0.12	499.4	0.32	497.4	0.32	495.4	0.12	493.4	0.12	491.4	0.44	489.4	0.44	487.4	0.44
1560	539.3	0.24	538.1	0.24	506.4	0.12	504.4	0.32	502.4	0.32	500.4	0.12	498.4	0.12	496.4	0.44	494.4	0.44	492.4	0.44
1590	544.9	0.24	543.7	0.24	511.4	0.12	509.4	0.32	507.4	0.32	505.4	0.12	503.4	0.12	501.4	0.44	499.4	0.44	497.4	0.44
1620	550.5	0.24	549.3	0.24	516.4	0.12	514.4	0.32	512.4	0.32	510.4	0.12	508.4	0.12	506.4	0.44	504.4	0.44	502.4	0.44
1650	556.1	0.24	554.9	0.24	521.4	0.12	519.4	0.32	517.4	0.32	515.4	0.12	513.4	0.12	511.4	0.44	509.4	0.44	507.4	0.44
1680	561.7	0.24	560.5	0.24	526.4	0.12	524.4	0.32	522.4	0.32	520.4	0.12	518.4	0.12	516.4	0.44	514.4	0.44	512.4	0.44
1710	567.3	0.24	566.1	0.24	531.4	0.12	529.4	0.32	527.4	0.32	525.4	0.12	523.4	0.12	521.4	0.44	519.4	0.44	517.4	0.44
1740	572.9	0.24	571.7	0.24	536.4	0.12	534.4	0.32	532.4	0.32	530.4	0.12	528.4	0.12	526.4					

a) Tipo de produto: laje de cimento Portland ASTM C 452-68  
b) Dimensões: comprimento (m) e largura (m); Permeabilidade (%) e  $V_a$  (m³)

TABLE A 52

• Fotografia(s) correspondente(s) a este  
Tubo: N/A

ASPCA 32

ID#	Porcentaje 80/20	Porcentaje 70/30	Porcentaje 60/40	Porcentaje 50/50	Porcentaje 80/20	Porcentaje 70/30	Porcentaje 60/40	Porcentaje 50/50	Porcentaje 80/20	Porcentaje 70/30	Porcentaje 60/40	Porcentaje 50/50	Porcentaje 80/20	Porcentaje 70/30	Porcentaje 60/40	Porcentaje 50/50	Porcentaje 80/20	Porcentaje 70/30	Porcentaje 60/40	Porcentaje 50/50
ID#	80/20	70/30	60/40	50/50	80/20	70/30	60/40	50/50	80/20	70/30	60/40	50/50	80/20	70/30	60/40	50/50	80/20	70/30	60/40	50/50
1	22.5	1.6	1.3	1.2	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
7	22.5	1.3	1.2	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
16	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
21	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
28	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
60	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
90	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
120	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
150	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
180	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
270	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
365	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
545	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
738	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
CEMENTO P-5 / PUZOLANA M	CEMENTO P-6 / PUZOLANA M	CEMENTO P-7 / PUZOLANA M	CEMENTO P-8 / PUZOLANA M	CEMENTO P-9 / PUZOLANA M	CEMENTO P-10 / PUZOLANA M	CEMENTO P-11 / PUZOLANA M	CEMENTO P-12 / PUZOLANA M	CEMENTO P-13 / PUZOLANA M	CEMENTO P-14 / PUZOLANA M	CEMENTO P-15 / PUZOLANA M	CEMENTO P-16 / PUZOLANA M	CEMENTO P-17 / PUZOLANA M	CEMENTO P-18 / PUZOLANA M	CEMENTO P-19 / PUZOLANA M	CEMENTO P-20 / PUZOLANA M	CEMENTO P-21 / PUZOLANA M	CEMENTO P-22 / PUZOLANA M	CEMENTO P-23 / PUZOLANA M	CEMENTO P-24 / PUZOLANA M	CEMENTO P-25 / PUZOLANA M
1	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
7	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
14	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
21	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
28	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
60	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
90	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
120	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
150	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
180	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
270	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
365	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
545	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3
738	22.5	1.1	1.1	1.1	21.4	2.5	2.8	2.2	2.8	2.5	2.3	2.5	2.8	1.1	2.5	2.2	1.3	1.3	1.3	1.3

a) Se da prova: 18/11/04 ASIN 6-452-64  
 b) Parametro(s) modif(ica)to(n)i: 11/01/04

**TABLA 53**

~~CONFIDENTIAL~~

IDP #	P-1/PUZOLANA M						P-2/PUZOLANA M						P-4/PUZOLANA M						P-32/PUZOLANA M						P-31/PUZOLANA M					
	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE	ATE	PAPE		
(mm)	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40			
7	28.2	5.42	42.8	5.12	53.8	7.88	36.1	5.18	47.8	6.80	57.0	8.57	35.4	5.08	54.1	7.71	52.8	7.44	22.2	4.48	26.5	1.79	14.3	2.08	29.2	6.17	23.1	4.08	42.5	5.2
10	31.2	5.33	46.5	5.51	56.8	8.00	38.8	5.53	52.1	6.96	57.3	8.22	38.1	5.39	54.8	7.71	53.4	77.2	8.50	53.1	5.18	46.4	5.28	36.2	6.22	42.8	6.81	48.1	6.28	
21	32.1	5.37	48.2	5.58	58.8	8.77	43.5	6.26	53.5	6.21	73.5	9.31	40.4	5.63	56.2	8.17	58.1	2.14	58.5	8.18	54.5	5.38	45.8	6.27	51.3	6.38	43.8	6.51	53.0	6.12
28	33.1	5.35	49.1	6.31	59.8	9.31	42.1	6.10	54.7	6.13	75.2	9.25	41.2	5.68	58.2	8.34	58.4	0.31	58.8	8.14	55.2	5.11	48.2	6.11	53.5	6.31	44.2	6.15	51.6	6.12
40	34.1	5.32	50.1	6.34	61.8	9.8	42.1	6.10	55.8	6.04	75.2	9.23	41.7	5.68	57.1	8.28	57.8	0.27	57.8	8.27	57.8	5.05	46.3	6.27	46.7	6.07	48.8	6.01	54.0	6.16
90	35.1	5.33	46.7	6.03	52.2	8.08	43.5	6.22	56.1	6.21	75.1	8.82	41.4	5.72	53.5	8.08	58.2	0.22	54.5	8.11	48.8	5.28	46.8	6.23	51.4	6.22	44.4	6.22	54.4	6.22
120	36.1	5.32	46.3	6.03	53.4	8.26	44.5	6.23	56.5	6.21	74.5	8.82	44.4	5.61	53.1	8.23	58.8	0.28	54.8	8.18	49.5	5.15	46.5	6.25	51.5	6.24	46.5	6.27	54.1	6.29
150	37.1	5.32	52.1	6.12	53.2	8.28	44.8	6.08	56.2	6.07	77.8	9.03	44.4	5.61	55.5	8.13	58.4	0.28	54.4	8.18	50.2	5.22	46.5	6.23	51.4	6.22	47.1	6.08	54.1	6.04
180	35.5	5.32	51.1	6.25	54.5	8.23	44.8	6.02	56.1	6.03	77.8	9.02	44.1	5.68	54.1	8.02	53.8	0.28	54.3	8.13	45.5	5.13	46.2	6.25	51.5	6.28	46.8	6.26	52.1	6.25
270	36.1	5.32	50.8	6.28	53.8	8.18	44.8	6.02	56.5	6.02	77.8	9.02	44.1	5.62	53.8	8.02	53.8	0.28	54.1	8.02	50.2	5.28	46.2	6.28	51.8	6.28	46.2	6.28	52.8	6.28
360	36.1	5.32	50.2	6.28	53.5	8.25	44.5	6.08	56.1	6.03	80.8	8.82	44.1	5.62	55.5	8.02	53.8	0.28	54.1	8.02	50.2	5.28	46.2	6.28	51.8	6.28	46.2	6.28	52.8	6.28
540	36.1	5.32	51.1	6.28	53.8	8.18	44.5	6.02	56.1	6.02	77.8	9.02	44.1	5.62	53.8	8.02	53.8	0.28	54.1	8.02	50.2	5.28	46.2	6.28	51.8	6.28	46.2	6.28	52.8	6.28
730	36.1	5.32	49.2	6.03	53.8	8.21	44.5	6.02	55.8	6.02	77.8	9.02	44.1	5.62	53.8	8.02	53.8	0.28	54.1	8.02	50.2	5.28	46.2	6.28	51.8	6.28	46.2	6.28	52.8	6.28
1040	CEMENTO P-3/PUZOLANA M						CEMENTO /PUZOLANA						CEMENTO P-1/PUZOLANA M						CEMENTO P-4/PUZOLANA M						CEMENTO P-5/PUZOLANA M					
(mm)	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40			
7	28.2	5.42	42.8	5.12	53.8	7.88	36.1	5.18	47.8	6.80	57.0	8.57	35.4	5.08	54.1	7.71	52.8	7.44	22.2	4.48	26.5	1.79	14.3	2.08	29.2	6.17	23.1	4.08	42.5	5.2
10	31.2	5.33	46.5	5.51	56.8	8.00	38.8	5.53	52.1	6.96	57.3	8.22	38.1	5.39	54.8	7.71	53.4	77.2	8.50	53.1	5.18	46.4	5.28	36.2	6.22	42.8	6.81	48.1	6.28	
21	32.1	5.37	48.2	5.58	58.8	8.77	43.5	6.26	53.5	6.21	73.5	9.31	40.4	5.63	56.2	8.17	58.1	2.14	58.5	8.18	54.5	5.38	45.8	6.27	51.3	6.38	43.8	6.51	53.0	6.12
28	33.1	5.35	49.1	6.31	59.8	9.31	42.1	6.10	54.7	6.13	75.2	9.25	41.2	5.68	58.2	8.34	58.4	0.31	58.8	8.14	55.2	5.11	48.2	6.11	53.5	6.31	44.2	6.15	51.6	6.12
40	34.1	5.32	50.1	6.34	61.8	9.8	42.1	6.10	55.8	6.04	75.2	9.23	41.7	5.68	57.1	8.28	57.8	0.27	57.8	8.27	57.8	5.05	46.3	6.27	46.7	6.07	48.8	6.01	54.0	6.16
90	35.1	5.33	46.7	6.03	52.2	8.08	43.5	6.22	56.1	6.21	75.1	8.82	41.4	5.72	53.5	8.08	58.2	0.22	54.5	8.11	48.8	5.28	46.8	6.23	51.4	6.22	44.4	6.22	54.4	6.22
120	36.1	5.32	46.3	6.03	53.4	8.26	44.5	6.23	56.5	6.21	74.5	8.82	44.4	5.61	53.1	8.23	58.8	0.28	54.8	8.18	49.5	5.15	46.5	6.25	51.5	6.24	46.5	6.27	54.1	6.29
150	37.1	5.32	52.1	6.12	53.2	8.28	44.8	6.08	56.2	6.07	77.8	9.03	44.4	5.61	55.5	8.13	58.4	0.28	54.4	8.18	50.2	5.22	46.5	6.23	51.4	6.22	47.1	6.08	54.1	6.04
180	35.5	5.32	51.1	6.25	54.5	8.23	44.8	6.02	56.1	6.03	77.8	9.02	44.1	5.68	54.1	8.02	53.8	0.28	54.3	8.13	45.5	5.13	46.2	6.25	51.5	6.28	46.8	6.26	52.1	6.25
270	36.1	5.32	50.8	6.28	53.8	8.18	44.8	6.02	56.5	6.02	77.8	9.02	44.1	5.62	53.8	8.02	53.8	0.28	54.1	8.02	50.2	5.28	46.2	6.28	51.8	6.28	46.2	6.28	52.8	6.28
360	36.1	5.32	50.2	6.28	53.5	8.25	44.5	6.08	56.1	6.03	80.8	8.82	44.1	5.62	55.5	8.02	53.8	0.28	54.1	8.02	50.2	5.28	46.2	6.28	51.8	6.28	46.2	6.28	52.8	6.28
540	36.1	5.32	51.1	6.28	53.8	8.18	44.5	6.02	56.1	6.02	77.8	9.02	44.1	5.62	53.8	8.02	53.8	0.28	54.1	8.02	50.2	5.28	46.2	6.28	51.8	6.28	46.2	6.28	52.8	6.28
730	36.1	5.32	49.2	6.03	53.8	8.21	44.5	6.02	55.8	6.02	77.8	9.02	44.1	5.62	53.8	8.02	53.8	0.28	54.1	8.02	50.2	5.28	46.2	6.28	51.8	6.28	46.2	6.28	52.8	6.28

De la Discusión 18: Vale aquí íntegramente idéntica interpretación VIII.1.2.2.2 (E)(F), 18, dada para idénticos casos estudiados mediante el ensayo L-A, pero amoldada a las características particulares del presente método de ensayo ASTM C 452, habiéndosele de imputar por tanto en este caso y una vez más a la puzolana M fundamentalmente, la consecuencia tan ríspida (a los 7 ó 14 días de edad de las probetas) de valores tan elevados de  $\overline{\Delta L}$ , RMF, RMC y Vu ó escasos de Porosidad y  $SO_4^{2-}$  lcp, así como de las Vv de los mismos a tal edad de 7 días, pudiéndose decir con fundamento que las reacciones puzolánicas derivadas de la misma deben transcurrir holgadamente, según todos los parámetros anteriores, durante los primeros 28 días del ensayo, y más concretamente durante los primeros 7 días, en la mayoría de los casos de esta puzolana M.

De la Discusión 28: Antes de pasar de lleno a la interpretación de esta discusión, conviene detenerse en la correspondiente a la de los parámetros RMF y RMC a la edad del ensayo de 1 día, véase discusión VIII.2.2.2.3 (F), 28.1., para decir que ello se debe a que ante la precariedad del agua de hidratación -pues recuérdese que a tal edad, el sistema probeta se mantuvo solo tiene mayormente el agua de amasado d-, la hidraulicidad, en su conjunto, de la masa conglomerante silicítica del mismo cemento P ó PY más puzolana M más yeso (7,0%  $SO_3$ ), deberá depender en origen de aquella fracción hidráulica de la misma due por su mayor presencia "física" más agua de amasado d, haya podido fijar, la cual no es otra, en el mejor de los casos (cemento de mezcla PUZ 60/40), que la fracción P ó PY en todos ellos y con más razón en sus hermanos mayores 70/30 y 80/20 por este orden; habiéndosele de imputar por tanto a ella y no a su fracción de puzolana M acompañante, el que tales valores de RMF y RMC obtenidos a dicha edad de 1 día, hayan disminuido con la adición de puzolana. Y como confirmación de lo dicho está:

- por un lado, que en todos los casos el P ó PY constitutivo sólo respectivo es el que mayor valor de  $RMC_{1d}$  y  $RMF_{1d}$  deberá tener, como así ha sido el caso, y
- por otro lado, el hecho totalmente contrario ocurrido a la edad de 7 ó 14 días en todos los casos (más a la primera edad), cuando ya para entonces todas las probetas y con ellas sus masas conglomerantes respectivas y en ellas la fracción de puzolana M correspondiente, ha podido disponer del agua de hidratación necesaria y suficiente para poder mostrar su verdadero carácter y con él sus consecuencias, o sea, aumento de los valores de RMF y RMC en todas las familias, con la adición de puzolana M.

A continuación vale aquí la parte correspondiente de las interpretaciones 28, 38 y 48 dadas para idénticos casos estudiados mediante el método de L-A, es decir, ello ha de ser debido una vez más a la  $Al_2O_3^-$  de la puzolana M, pues :

- a) dichos parámetros de  $\bar{\Delta}L$ , RMF, RMC y Vu, y disminución de Porosidad y  $SO_4^{2-} lcp$ , en probetas hermanas a la edad de 7 días, se originan con la adición de puzolana M, en todas las familias de cementos de mezcla PA y PUZ, tenga, ó no,  $C_3A$  el cemento portland matriz acompañante respectivo,
- b) el  $\bar{\Delta}L$ , RMF, RMC y Vu de las probetas de cualquier cemento de mezcla,  $\frac{a}{c} = g$  ó  $d$ , a la edad de 7 días, es siempre superior al de su cemento portland matriz conformante respectivo (el correspondiente de Porosidad y  $SO_4^{2-} lcp$ , inferior), pese a que este fuese del máximo contenido de  $C_3A$ , caso del P-1 con 14,11% de  $C_3A$ , y
- c) el valor máximo de  $Vc1$ ,  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$ , se alcanza en todas las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con puzolana M y así ensayados, mucho antes que lo alcanzan las de su cemento portland matriz acompañante respectivo, y por lo común durante los primeros 28 días del ensayo y mas concretamente en este caso durante los primeros 7 días.

Y todo ello porque, al parecer, debe de haber suficiente cantidad de  $SO_3$ , para que ocurra, puesto que por estequiometría, 7,0% de  $SO_3$  necesitaría 3,10% de  $Al_2O_3^{r-}$  para pasar totalmente a ett-rf, y en el mejor de los casos estudiados, cemento PUZ 60/40, sólo hay 0,42% de  $Al_2O_3^{r-}$  (40% de 2,08% x 50,35%); luego en las probetas de dichos cementos de mezcla deberá sobrar  $SO_3$  del 7,0% inicial (0,42%  $Al_2O_3^{r-} > 0,95\% SO_3$ ), para con posterioridad, poder formar, en su caso, ett-lf, y mas aún en las del 70/30 y 80/20, por este orden respectivamente, hermanas. Por lo tanto y resumiendo, a mas puzolana M añadida mas  $Al_2O_3^{r-}$  aportada, mas ett-rf formada y por lo tanto,

- mayores  $\bar{\Delta}L$ , Vc, RMF, RMC y Vu, y

- menores Poros y  $SO_4^{2-} lcp$ ,

originados a tal edad de 7 días, como así ha ocurrido en este trabajo.

Porque no obstante, y en el supuesto falso de que ambas ettringitas de orígenes distintos tuvieran igual Vf, e igual a la de la ett-rf, a la edad de 7 días, se verificaría que:

- a) en las probetas de las familias de cementos de mezcla P-1/M 80/20, 70/30 y 60/40, P-2/M 80/20 y 70/30, P-4/M 80/20 y 70/30, y P-32/M 80/20



- se deberá de "consumir" prácticamente TODO el 7,0% de  $SO_3$  puesto inicialmente como agresivo, ya que por estequiometría,

$$\begin{aligned}
 &P-32/M \quad \left\{ \begin{array}{l} 80\% \times 9,30\% = 7,44\% < 6,67\% SO_3 \\ 20\% \times 2,08\% \times 50,35\% = 0,21\% < 0,47\% SO_3 \end{array} \right. \quad SO_{3total} = 7,09\% SO_3 > 7,0\% \\
 &80/20 \\
 &P-32/M \quad \left\{ \begin{array}{l} 70\% \times 9,30\% = 6,51\% < 5,79\% SO_3 \\ 30\% \times 2,08\% \times 50,35\% = 0,31\% < 0,71\% SO_3 \end{array} \right. \quad SO_{3total} = 6,50\% SO_3 < 7,0\% \\
 &70/30 \\
 &P-32/M \quad \left\{ \begin{array}{l} 60\% \times 10,71\% = 6,43\% < 5,72\% SO_3 \\ 40\% \times 2,08\% \times 50,35\% = 0,42\% < 0,95\% SO_3 \end{array} \right. \quad SO_{3total} = 6,67\% SO_3 < 7,0\% \\
 &60/40
 \end{aligned}$$

luego si al cemento de mezcla PA P-32/M 80/20 le falta  $SO_3$  para pasar todo su  $C_3A$  y  $Al_2O_3^r$  a ettringita, en aquellos P-1/M, P-2/M y P-4/M anteriores, con mas razón, por ser el sumando  $C_3A$  mayor en todos ellos al aumentar el mismo con el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz respectivo, por lo que,

- los líquidos de conservación correspondientes, deberán tener igual cantidad de  $SO_{4lcp}^-$ , la cual habría de ser muy escasa ó prácticamente nula, y por lo tanto
- los  $\bar{A}L$  respectivos originados, ser iguales en todos los casos, haya mucha o poca puzolana M, y

b) en las probetas del resto de las familias de cementos de mezcla ensayadas, incluidas las del P-4/M 60/40, debería ocurrir, por igual motivo, todo lo contrario, es decir, "sobrar"  $SO_3$  del 7,0% inicial puesto como agresivo común; con lo que por igual razón estequiométrica, en cualquier familia de cementos de mezcla PA y PUZ, (excepto en las familias PY-4/M y PY-6/M en las que al excedente de  $SO_3$  le deberá de ocurrir todo lo contrario por las razones que se verán mas adelante),

- los 80/20 fijarán mas  $SO_3$  que los 70/30 hermanos, y éstos mas que los 60/40 hermanos, pues por ejemplo,

$$\begin{aligned}
 &P-31/M \quad \left\{ \begin{array}{l} 80\% \times 7,62\% C_3A \text{ del P-32} = 6,10\% C_3A < 5,43\% SO_3 \\ 20\% \times 2,08\% \times 50,35\% Al_2O_3^r \text{ de M} = 0,21\% Al_2O_3^r < 0,47\% SO_3 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Cantidad de} \\ SO_3 \text{ que fijarían} \end{array} \\
 &80/20 \quad \left\{ \begin{array}{l} 70\% \times 7,62\% C_3A \text{ del P-32} = 5,33\% C_3A < 4,74\% SO_3 \\ 30\% \times 2,08\% \times 50,35\% Al_2O_3^r \text{ de M} = 0,31\% Al_2O_3^r < 0,71\% SO_3 \end{array} \right. \quad SO_{3t} = 5,90\% < 7,0\% \\
 &P-31/M \quad \left\{ \begin{array}{l} 70\% \times 7,62\% C_3A \text{ del P-32} = 5,33\% C_3A < 4,74\% SO_3 \\ 30\% \times 2,08\% \times 50,35\% Al_2O_3^r \text{ de M} = 0,31\% Al_2O_3^r < 0,71\% SO_3 \end{array} \right. \quad SO_{3t} = 5,45\% < 7,0\% \\
 &70/30 \\
 &P-31/M \quad \left\{ \begin{array}{l} 60\% \times 7,62\% C_3A \text{ del P-32} = 4,57\% C_3A < 4,06\% SO_3 \\ 40\% \times 2,08\% \times 50,35\% Al_2O_3^r \text{ de M} = 0,42\% Al_2O_3^r < 0,95\% SO_3 \end{array} \right. \quad SO_{3t} = 5,02\% < 7,0\% \\
 &60/40
 \end{aligned}$$

por lo que,

- los líquidos de conservación correspondientes, deberían tener igual cantidad de  $\text{SO}_4^=$  lcp, el valor de la solubilidad del yeso en dis.sat. de  $\text{CaCOH}_2$ , confirmese, siendo apreciable su presencia, a diferencia del caso anterior a), y
- los  $\bar{\Delta}\text{L}$  respectivos originados, disminuir con la adición de puzolana M, excepto como se ha dicho en las probetas de las familias PY-4/M y PY-6/M que sería aumentar, por ser prácticamente nulo el  $\text{C}_3\text{A}$  de las mismas y su consumo de  $\text{SO}_3$  correspondiente, quedando tan solo el derivado de la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la puzolana M que aumentará con la adición de la misma y de igual modo sus  $\bar{\Delta}\text{L}$  respectivos, como se acaba de decir (confirmese porque los valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$   $0,21\% > 0,31\% > 0,41\%$  guardan relación creciente con la adición de puzolana).

; Y nada de lo dicho en a) y b), (a excepción de lo correspondiente a las familias PY-/M y PY-6/M), ha ocurrido, sino todo lo contrario ! es decir,

- el contenido de  $\text{SO}_4^=$  lcp ha disminuído en todas las familias con la adición de puzolana M, y
- los  $\bar{\Delta}\text{L}$  respectivos originados han aumentado con la adición de la misma.

Luego la hipótesis inicial no es verdadera, por lo que ha de serle imputada a dicha puzolana M, y mas concretamente a su  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  constitutiva y su mayor Vf de ettringita, que del  $\text{C}_3\text{A}$ , el origen de tales valores de  $\text{SO}_4^=$  lcp,  $\bar{\Delta}\text{L}$  y Vcl obtenidos y su orden cronológico inicial alcanzado en todos los casos, lo cual es concordante con la conclusión VII.4.2, 9ª (POP), y la interpretación VIII.1.2.2.2. (L-A).

Por otra parte ello es indicio evidente de que la formación de ettringita TOTAL ha de ser adscribible más al topoquímico, con ó sin disolución previa, que al de through-solution, pues los resultados obtenidos están mas en relación con el cociente  $\frac{\% \text{C}_3\text{A} + \% \text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}}{\% \text{SO}_3}$  que con la hipótesis falsa y sus consecuencias correspondientes.

No obstante y pese a que la Vf de la ett-rf sea mayor que la Vf de la ett-lf, la competitividad entre ambos,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  y  $\text{C}_3\text{A}$ , por la fijación del 7,0% de  $\text{SO}_3$  inicial puesto como agresivo, es un hecho cierto, no anulándose ni en el momento inicial del ensayo, sino todo lo contrario; por lo que en todos los casos, la primera,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , no podrá impedir que la segunda,  $\text{C}_3\text{A}$ , forme ett-lf, y viceversa, con mayor razón. Por lo que según ello y SOBRE TODO los resultados experimentales obtenidos, en todas las familias de cementos de mezcla PA y PUZ, la

ettringita TOTAL.  $ett-T$ , a la edad de 7 días, suma de la  $ett-rf$  más  $ett-lf$ , de las probetas 60/40, ha de ser mayor que la  $ett-T$  de las probetas hermanas 70/30 y ésta mayor que la  $ett-T$  de las correspondientes hermanas 80/20, pese a que los cálculos estequiométricos lo denieguen y los contenidos de  $SO_4^{2-}$  lcp, los  $\bar{A}L$  y  $Vcl$  originados por las mismas, nos lo confirmen. Por lo tanto para que aquella relación de ettringitas TOTALES se haya verificado, en contra de como debiera por la estequiometría, ha de ser necesario, al menos, que en todas las familias la  $Vf$  de la  $ett-T$  60/40, haya sido mayor que la  $Vf$  de la  $ett-T$  70/30 hermana y ésta mayor que la  $Vf$  de la  $ett-T$  80/20 hermana, lo cual da pie para pensar con fundamento de la existencia de una "acción sinérgica" durante los primeros 7 días del ensayo, entre la  $ett-rf$  y la  $ett-lf$  formadas al unísono, la cual alcanza su máxima expresión, a dicha edad, es decir, su máximo valor de  $\bar{A}L$  y  $Vcl$  y mínimo de  $SO_4^{2-}$  lcp, en los cementos de mezcla PUZ 60/40 de todas las familias de cementos de mezcla PA y PUZ, o sea, en aquéllos de máximo contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  y mínimo de  $C_3A$ , y viceversa en las del 80/20 hermanas, como ocurriera en todas las familias de cementos de mezcla correspondientes ensayadas mediante el método L-A.

No obstante llama poderosamente la atención de que la misma sólo se justifique de igual modo mediante los parámetros RMF y RMC en iguales cementos de mezcla 60/40 de cemento portland matriz acompañante de escaso a nulo contenido de  $C_3A$ , y no en los de mediano y elevado contenido de  $C_3A$ , donde a tenor de los resultados experimentales obtenidos de sus probetas respectivas podría decirse que dicha acción sinérgica máxima a la edad de 7 días se produce en los cementos de mezcla 80/20 respectivos, y no en los 60/40 hermanas, como en el caso anterior, pese a que los correspondientes valores de porosidad,  $Vu$  y  $SO_4^{2-}$  lcp, amén de los  $\bar{A}L$  anteriores, aboguen por estos últimos 60/40 y no por aquéllos 80/20.

Y la razón de esta disparidad demostrativa estribaría en lo siguiente:

En primer lugar y merced a la extraordinaria acción puzolánica de la puzolana M, véase la Fig. 4, en un medio selenitoso (con 7,0% de  $SO_3$  inicialmente) se formaría mayormente la  $ett-rf$  <sup>ria</sup> correspondiente a su  $Al_2O_3^{r-}$ , dada su mayor  $Vf$ , la cual actuaría,

- expandiendo, o sea, provocando un aumento de  $\bar{A}L$  y porosidad y una disminución de la  $Vu$  y la  $SO_4^{2-}$  lcp, correspondientes, y subsidiariamente,
- originando un descenso del contenido de  $Ca(OH)_2$  de la fase líquida del mortero, merced a su acción puzolánica, véase Fig. 4, el cual al estar por debajo del valor de saturación correspondiente, o sea, por debajo de la propia curva de Fratini, facilitará por esta causa una mayor y más rauda hidratación (no se olvide que selenitoso en este caso) de los  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_4AF$  y  $C_3A$ , y mayor aún obviamente del  $C_3A$  y  $C_3S$ , por este orden de mayor a menor, de la fracción aún anhidra del clínker portland acompañante respectivo; con lo cual y de esta manera el  $C_3A$  residual (el total de origen, menos el que ha originado la  $ett-lf$  por el agua de amasado del mortero) formaría su  $ett-lf$  correspondiente a "remolque" de la anterior, dada además su menor  $Vf$ , la cual colmataría la porosidad, también subsidiaria, acabada de originar previamente por aquella ó  $ett-rf$  del  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana M ó quizás por sólo parte de la misma, aunque no obstante manteniéndose en cualquier caso el fundamento del proceso expuesto. De aquí que en el caso del último cemento de mezcla, 60/40 citado, de cada familia, al ser el que menos  $C_3A$  posee, se le ha de colmatar menos, a tal edad de 7 días, dicha porosidad total previamente originádosela por aquélla, debiéndose alcanzar para entonces menor RMF y RMC que en el resto de las probetas de los cemen-

tos de mezcla hermanos 70/30 y 80/20, por este orden, según lo ocurrido en este trabajo; y menor aún cuando el cemento portland matriz acompañante fuese de escaso a nulo contenido de  $C_3A$ , como así ha ocurrido en este trabajo.

Y para que el proceso justificativo de estos hechos así ocurra, se deberá exigir por consecuencia, que las fracciones portland acompañantes correspondientes P-nº ó PY-nº, posean unas características físico-químicas tales (tengan ó no,  $C_3A$ ) que interfieran inicialmente -durante el tiempo de fraguado,  $t_f$ , de la pasta conglomerante (con 7.0% de  $SO_3$ ) del mortero selenitoso ASTM C 452-68- lo menos posible, la verificación de dichos procesos, expansivo y colmatante, debidamente sincronizados.

-- Con lo cual dicho fraguado deberá recaer principalmente sobre la parte conglomerante de la pasta constituida mayormente por la fracción puzolana M en cada caso y su actividad puzolánica correspondiente en medio tan selenitoso (7.0% de  $SO_3$ ).

-- Y para eso, los contenidos, entre otros, de  $C_3S$ ,  $CaO_{comb.}$ , Standard de Cal y la superficie específica ó grado de finura de molido de aquéllos, P-nº ó PY-nº, que la acompañen en cada caso, deberían ser los menores posibles, para de este modo no interferirlo.

Por el contrario, los tiempos o fases que se solapan con el fraguado de la pasta cementante selenitosa del mortero, como son la pseudo-plástica y de endurecimiento del mismo, deberán recaer ahora entonces sobre la fracción que posee estas últimas características citadas, que no es otra que la P-nº ó PY-nº (acompañante de la puzolana M en cada caso); debiendo actuar dicha fracción P-nº ó PY-nº, de modo y manera que en general el conjunto de estas dos últimas fases junto con el propio tiempo de fraguado se prolonguen lo mas posible, sin menoscabo de lo especificado al respecto (1) para cada uno de ellos, siempre y cuando tales especificaciones actuales (1) no mengüen una mayor rentabilidad tecnológica y económica del cemento de mezcla resultante.

De este modo la ettringita residual de cualquier origen y etiología que se forme durante dichas dos últimas fases citadas, podrá aún colmatar con su expansión la porosidad subsidiaria originada por ella misma además de la originada antes por la ettringita <sup>ria</sup> mayormente, y quizás también por una parte del total de la ettringita <sup>ria</sup> que se habrá de formar además, por la acción sinérgica correspondiente fruto de la actividad puzolánica de la puzolana M.

Y en esta situación, la función que tendría que cumplir el  $C_3A$  de la fracción P-nº ó PY-nº sería la de formar la mayor parte de su ettringita total correspondiente, en el momento mas oportuno, que no es otro, principalmente, que durante las fases pseudo-plástica y de endurecimiento del mortero, citadas antes, pudiendo ser en ocasiones toda ella. De este modo el  $C_3A$  actuaría en definitiva,

-- por un lado, en idéntico sentido que el derivado de los condicionantes impuestos antes al  $C_3S$ ,  $CaO_{comb.}$ , Standard de Cal y grado de finura de molido ó superficie específica de la fracción P-nº ó PY-nº, según el caso, y

-- por otro, colmatando mayormente con posterioridad, según se ha indicado antes.

Y para que ello así ocurra, se deberá cumplir por tales motivos que, en tanto en cuanto mayor sea el contenido de  $C_3A$  del cemento portland acompañante de la puzolana M, menor grado de finura de molido deberá poseer, y viceversa. Teniendo en cuenta además que todo este proceso se debería ver favorecido también haciendo que la función a desempeñar por la fracción de puzolana M,

de la cual se habló antes, durara el menor tiempo posible, es decir que el Principio de Fraguado, FF, derivada de la misma, fuera lo menor posible, o sea, al contrario de lo dicho para el tiempo total de duración de las fases, Fin, FF, y Tiempo de Fraguado, Tf, y pseudo-plástica y de endurecimiento del mortero, citados antes. Y para que ello así tal ocurriese, el grado de finura de molido de la puzolana M debería ser el mayor posible, o al menos, el más adecuado posible, en dicho sentido.

Con lo cual y sin habérnoslo propuesto, finalizamos la discusión de la hipótesis explicativa del proceso expuesto, haciendo una justificada APOLOGIA DE LA MOLIENDA POR SEPARADO de ambas fracciones portland "X" y puzolana "Z" constitutivas en exclusiva de cada cemento de mezcla, seguida de su MEZCLADO y HOMOGENEIZACIÓN correspondiente, de cuya forma de poderlas llevar a cabo en la práctica, junto con el regulador de fraguado adecuado, en calidad y cantidad, en cada caso, se hablará más amplia y detalladamente al final de la Aplicación XII. 10ª.

Por lo tanto de esta manera, toda o la mayor parte de la ett-total a originar por la mezcla-conglomerante selenitosa correspondiente, Cemento Portland (ó Clínter Portland más regulador de fraguado adecuado en calidad y cantidad, según sea el caso) "X" más Puzolana "Z", únicamente, se aprovecharía para originar RM a edades iniciales especialmente -como en ese sentido ha ocurrido en este trabajo- y no en cambio efectos nocivos a edades posteriores, con lo cual se aumentaría quizás además la RS de dicho mortero y por tanto de su cemento de mezcla constitutivo. Y para que ello así ocurra en su mayor parte en todos los casos posibles existentes en la realidad, Cemento Portland "X" (ó Clínter Portland "X" más regulador de fraguado adecuado, en su caso) y Puzolana "Z", se ha de tener en cuenta lo dicho al respecto en las Deducciones de Interés X.11ª y 22ª. Y es que si la consecución de un NOTABLE descenso del contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  de la fase líquida de la pasta, mortero (1:2,75 y selenitosa con 7,0% de  $\text{SO}_3$  en este caso) u hormigón, es determinante en todos los casos posibles para dicho fin, sea cual fuere la Puzolana "Z", el mismo, para poder llegar a ser NOTABLE en todos ellos, exigirá por consecuencia que dicha Puzolana "Z" esté "adecuadamente volida" para alcanzarlo. Ello determinará por tanto, según los resultados experimentales obtenidos de las puzolanas ensayadas en este trabajo según el ensayo de Fratini, véase la Fig. 4, que en tanto en cuanto más silficia que aluminica sea la Puzolana que se emplee, mayor habrá de ser lógicamente su superficie específica o grado de finura de molido, y viceversa. Por lo que cada puzolana impondrá, según sea su carácter (véanse las Aplicaciones XII. 2ª, 4ª, 5ª, 7ª y 8ª) su grado de finura de molido o superficie específica más ADECUADO para obtener de ella su máxima rentabilidad tecnológica y económica, y en cualquier caso la MOLIENDA POR SEPARADO de su fracción Portland (Cemento ó Clínter más regulador de fraguado adecuado, según sea el caso) "X" correspondiente, seguida del mezclado y homogeneización según se dijera con anterioridad.

Y como pruebas a favor de la hipótesis explicativa propuesta del proceso se encuentran las siguientes:

1ª.- Las características físico-químicas de los cementos portland

- P-1 y P-2, por un lado, y
- PY-4 y PY-6, por otro, véase la Tabla II.

24... Los Principios, Pf, Finales, Ff y tiempos de Fraguado, Tf. (en horas, h., y minutos, min.) de dichos cementos portland.

TABLA 92

CEMENTOS	PRINCIPIO DE :	FINAL DE :	TIEMPO DE :
	F R A G U A D O		
P-1	2 h.	2 h. 39 min.	39 min.
P-2	2 h. 10 min.	3 h. 9 min.	59 min.
PY-4	2 h. 15 min.	2 h. 65 min.	50 min.
PY-6	5 min.	25 min.	20 min.

34... Los valores de  $\bar{A}$  y RMC, especialmente, a edades iniciales, y de entre todos ellos los de este último parámetro,

- de 1 a 7 días por un lado y para las familias P-1/M y P-2/M, y entre ambas los de los cementos de mezcla 80/20 y 70/30 en un sentido y los del 60/40 en el sentido opuesto, y
- de 14 a 28 días por otro, y para las familias PY-4/M y PY-6/M, véase las Tablas 48 y 49,

44... Los valores experimentales obtenidos del ensayo de Frattini, véase la Fig. 4.

54... La Interpretación de la Discusión VIII.2.2.2.7, 24, correspondiente a la evolución de las franjas de nubes de puntos de la Tabla 7i.

64... Las pruebas experimentales realizadas al efecto por nuestra parte a varias fábricas de cemento españolas, que confirmaron la veracidad de la presente hipótesis, no pudiéndose hacer públicos sus resultados en razón a que la entidad a la que pertenezco, IETEC (CSIC) lo tiene prohibido expresamente, por razones obvias.

Las cuales fundamentan en gran medida la hipótesis explicativa del proceso que se ha discutido y que a buen seguro lo continuará siendo.

No obstante y pese a lo cual y a las razones anteriores dadas, lo único verdaderamente cierto de todo ello es lo siguiente:

19... La hipótesis propuesta explicativa del proceso no es a buen seguro la única y más verdadera, pudiendo existir otras diferentes a la misma, más acertadas aún seguramente, como lectores tenga esta MEMORIA.

29... Sea cual fuere la auténtica hipótesis explicativa del proceso, la misma bien podría ser confirmable mediante otras técnicas analíticas distintas a la DRX e IR, como quizás pueda ser entre otras el SEM, siempre y cuando la ett-rf y la ett-lf, aunque morfológicamente sean iguales, dimensionalmente sean al menos bastante diferentes entre otras diferencias morfológicas.

39... En cualquier caso y sea cual fuere la hipótesis verdadera demostrada o demostrable, la misma no irá en contra del fundamento operativo de la aquí propuesta.

49... El fundamento operativo de la hipótesis que sea la verdadera ó ACCION SINERGICA MAXIMA ó ADECUADA, según convenga, entre la ett-rf <sup>ria</sup> que acompañe a aquella en su caso, únicamente será lo bastante rentable desde un punto de vista estrictamente tecnológico y -

quizás también económico, haciendo que la mayor parte de la segunda ó  $\text{ett-lf } 1^{\text{ria}}$  colmate lo mas posible la porosidad subsidiaria creada previamente por la mayor parte de la primera ó  $\text{ett-lf } 1^{\text{ria}}$ . Y ello únicamente se puede conseguir determinando el contenido de " $\text{SO}_3$  óptimo" en calidad y cantidad, de cada cemento de mezcla, para que el mismo -ensayado según la técnica operativa del método ASTM C 452- nos proporcione el máximo valor posible de  $\bar{A}_{28d}$ , compatible con el máximo valor posible de  $\text{RMC}_{28d}$ , en probetas de  $1 \times 1 \times 6$  cm de idéntico mortero selenitoso. No obstante y en cualquier caso, dicho "Óptimo de  $\text{SO}_3$ " no deberá sobrepasar el valor topoe máximo del 7,0% de  $\text{SO}_3$ , en vista de los resultados experimentales aquí obtenidos. Véase además la Aplicación XII.10<sup>a</sup>.

59.- Sea cual fuere la hipótesis explicativa verdadera del fundamento del proceso expuesto, el mismo es aplicable a cualquier Cemento de Mezcla -constituído por Cemento Portland "X" más Puzolana "Z" más Yeso "Y" (ó mejor quizás,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , "Y")- que se prepare para un fin determinado.

Y respecto a lo ocurrido con los valores de las RMF, RMC y parámetros derivados correspondientes, se puede decir que ello probablemente sea ya para entonces consecuencia directa de las hidrataciones ulteriores a la edad de 7 días habidas en las probetas respectivas antes citadas, las cuales y por la razón última dada deberán verse tanto más dificultadas cuanto menor porosidad tuvieran las probetas, o sea, cuanto más colmatadas por  $\text{ett-rf}$  primero y  $\text{ett-lf}$  después, la cual lo podrá estar tanto más cuanto más  $\text{C}_3\text{A}$  posea, y viceversa. De aquí que, en ausencia de este último, caso de los cementos de mezcla PA y PUZ de cementos Portland matriz constitutivo PY-1 ó PY-4 ó PY-6, por este orden, menos colmatadas por  $\text{ett-lf}$  estarán, más se podrán hidratar por tanto sus  $\text{C}_3\text{S}$  y/o  $\text{C}_2\text{S}$  constitutivos, (que en el caso opuesto, presencia elevada de  $\text{C}_3\text{A}$ ), dando por ello mayores RMF y RMC a tal edad de 730 días, como así ha ocurrido en este trabajo.

Y volviendo al inicio de la interpretación de esta discusión y mas concretamente a lo acaecido contrariamente en todas las familias de cementos de mezcla preparados con la puzolana M y así ensayados, en la evolución de sus valores de RMC y RMF respectivos a la edad de 1 día y 7 días en adelante, cabría preguntarse: Y ¿Cuál sería la forma de que dicha puzolana M mostrara su innata actividad hidráulica a partir de la edad de 1 día inclusive y no en cambio posteriormente cuando sus probetas de mortero selenitoso u hormigón, en su caso, correspondientes, han estado conservadas bajo agua?. Pues haciendo que su superficie específica aumente en todos los cementos de mezcla ensayados, y más aún cuanto menor sea su presencia, y viceversa, mientras que a la fracción P ó PY que la acompañe, le deberá ocurrir todo lo contrario (y tanto más todo lo contrario cuanto mayor sea el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  de la misma, y viceversa, para de este modo poder alcanzar mejor la acción sinérgica máxima si es ésta la adecuada).

De este modo, la fracción M, pese a su menor cantidad de masa presente, aunque mayor superficie específica, podrá captar para sí desde el instante mismo del amasado, mayor cantidad de agua de amasado de la necesaria empleada para amasar adecuadamente su mortero, que la fracción P ó PY que la acompañe.

No obstante, ello podría acarrear quizás una disminución del pH de la fase líquida del mortero u hormigón correspondiente y de este modo una menor reactividad de la misma con el árido y por consiguiente una menor ligazón ó trabazón entre la pasta cementante, cemento portland P ó PY + Pozolana M + Yeso (7,0% de SO<sub>2</sub>), y dicho árido. Pudiéndose subsanar pese a ello la misma, mediante un mayor y mejor grado de curado de aquél(los) que el tradicional, en calidad, cantidad y tiempo. De esta manera se facilitaría una hidratación ulterior adicional del resto de la fracción P ó PY aún anhidra y de menor superficie específica, la cual al deberse verificar superficialmente y de fuera a adentro de cada grano de clínker, autolimitándose con el tiempo por razones obvias, aseguraría de este modo una mayor fracción aún anhidra de clínker para la psoteridad y por esta causa una mayor durabilidad de la obra civil realizada. Y no como está ocurriendo en la actualidad, que es tal el grado tan elevado en ocasiones de finura de sólido del cemento de mezcla que se emplea, que al mismo entre

- dicha característica tan elevada que ha de poseer,
- la acción puzolánica de la puzolana que le acompañe,
- la acción sinérgica derivada de la misma, y consiguientemente,
- la mayor necesidad de agua de amasado para alcanzar el grado de trabajabilidad tradicional que proporciona un cemento portland a su mortero u hormigón correspondientes,

hará que la reserva portlandítica deba ser menor y con ella la durabilidad de la obra civil afectada, la cual deberá verse no por mucho tiempo interrumpida por causa de la carbonatación por meteorización, como así está ocurriendo con notable frecuencia en la actualidad.

Todo ello por tanto,

- reafirmará las consecuencias derivadas al respecto con anterioridad y aducidas desde otro punto de partida en el razonamiento, y
- fundamenta las Aplicaciones XII. 10ª, 11ª y 12ª expuesta al final de este MEMORIA.

Y en cuanto a la explicación posible del por qué en la mayoría de las familias cuyo cemento portland constitutivo posea de elevado a bajo contenido de C<sub>3</sub>A, los valores de RMC de tales cementos matrices conformantes respectivos sólo, suelen ser por lo general algo mayores que los de sus cementos de mezcla correspondientes a las edades finales del ensayo, ocurriendo lo contrario con los de RMF respectivos, puede ser debido al carácter más colmatante que enlazante de la ettringita, de lenta formación, en este caso (que como se sabe también participa en la consecución de RM de las probetas). Lo cual unido a la mayor reserva portlandítica de aquéllos, los P, sobre los de mezcla con la puzolana M,



de ellos derivados, permitirá el mantenimiento por mas tiempo del valor del pH  $> 10,8$  y del valor de la  $[CaC]$  en la fase líquida de los mismos, los cuales son imprescindibles para el mantenimiento como tal de aquella, la ett-1f. Ello lleva implícito, que ante la presencia de una puzolana, y mas la aluminica M, tales condicionantes del medio se puedan llegar a dejar de cumplir bastante antes, aunque continuando eminentemente básicos, pero no lo suficiente quizás para la permanencia como tal de aquella (admitiéndose como posible que la lixiviación y posterior carbonatación de parte de la cal de hidrólisis se consideraría constante en ambos casos) que pasaría a  $C_4A_H_{x,y,z}$  para participar en el mantenimiento de las mismas, lo cual se traduciría en mantenimiento o suave disminución de los valores de los RMC de los mismos respecto a los de su cemento portland matriz acompañante respectivo P solo, (los cuales se mantendrían o podrían continuar creciendo por todo lo contrario), como así ha sucedido en este trabajo. Por otra parte el que tales hechos no se confirmen de igual modo en iguales casos y edades, en los valores de los RMF correspondientes, vendría a indicar que la ett-rf es algo mas colmatante y enlazante que la ett-1f que le acompaña o está en las partes internas de las probetas por formarse antes que la ett-1f, debiendo de ser ésta a la que principalmente se le deba de inculpar la mengua en los valores de RMC a tales edades finales, por todo lo contrario, o sea, por deberse de encontrar en las partes más externas de dichas probetas con lo que de este modo sería más sensible a los cambios de pH y  $[CaO]$  de la fase líquida que las rodea y consiguientemente su permanencia en el tiempo como tal podría peligrar pasando quizás entonces a  $C_4AH_{19}$ ,  $C_4AH_{13}$ , o cualquier otro aluminato de calcio hidratado más estable en las nuevas condiciones de pH y  $[CaO]$  del medio, pero indudablemente de menor volumen molar que la ettringita y por tanto menos colmatante, de aquí la ligera mengua en los valores de Porosidad correspondientes obtenidos.

Y a tales razones habrá que añadir además la que se expone en la mitad inferior de la pag. 418. Todo ello se ve confirmado porque tales hechos no ocurren de igual modo en el caso de los cementos homónimos de cemento portland matriz PY, a los cuales le suele ocurrir entre sí en RMC y a tales edades finales todo lo contrario, hecho lógico porque en este caso la ett-1f, que es según la hipótesis anterior la más sensible, resulta en estos casos más bien escasa o nula, y porque por lo general el mayor contenido de  $C_3S$  de este tipo de cementos portland sobre los P permitirá el mantenimiento de tales condicionantes del medio pH

y  $[\text{CaO}]$  por más tiempo en todos los casos y aún en los de sus cementos de mezcla respectivos, a los que por tener además, ett-rf presente les deberá ocurrir todo lo contrario que en el caso anterior, es decir, mayores valores de RMC que sus PY solos, como así ha ocurrido en este trabajo. Tales mayores  $[\text{CaO}]$  se pueden observar en la Fig. 4.

Y a propósito de todo este razonamiento se ha de aclarar que el mismo no deberá ocurrir necesariamente y por lo común de igual modo en la realidad de cualquier obra civil, pues el curado del hormigón de este tipo de cementos de mezcla (ya sean de matriz P o PY) con que se hiciere la misma no será jamás de 2 años bajo agua potable (1 mes o algo más a lo sumo en el peor de los casos), como ha ocurrido en este trabajo, con lo que la reserva portlandítica deberá ser de mayor duración en el tiempo - o sea, similar en fundamento al último y mejor caso de todos los expuestos de cementos de mezcla, es decir, los de matriz PY -, permitiendo de este modo su permanencia, como tal, durante la vida de servicio útil de aquella, de la ett-rf y ett-lf inicialmente formadas, colmatadoras y creadoras de tan notables valores de RMF y RMC a edades iniciales, los cuales podrán incluso mantenerse y crecer incluso ligeramente con el tiempo sin altibajos apreciables.

Y volviendo al tema que nos ocupaba y ocupa, se ha de decir que el hecho de no haberse destruido a edades posteriores las probetas en ningún caso, tanto si tuviere mucho como si tuviere poco  $\text{C}_3\text{A}$  el cemento portland matriz acompañante respectivo, caso del P-1, P-2, P-4, P-32, P-31, P-5, PY-5 y PY-1, hace pensar que de los mismos no debe haberse formado con posterioridad ett-lf por haberse consumido quizás todo el 7,0% de  $\text{SO}_3$  o al menos la mayor parte, inicialmente, - como se puede confirmar mediante la disminución tan notable de la cantidad de  $\text{SO}_4^{2-}$  respectivas a las edades intermedias y finales del ensayo - gracias a la "acción sinérgica" entre la  $\text{Al}_2\text{O}_3^-$  y el  $\text{C}_3\text{A}$  en cada caso aceleradora de todo el proceso de hidratación selenitosa y sus consecuencias pertinentes.

Por lo tanto dicha "acción sinérgica", unida a la mayor porosidad de este sistema, probeta de mortero, que aquél, torta de pasta, deberá hacer que el consumo total, en su caso, del 7,0% de  $\text{SO}_3$  puestoles inicialmente como agresivo común, se verifique, según se acaba

de decir, mas pronto, lo cual unido a la menor cantidad del mismo que en el L-A, 15,50% de  $SO_3$ , hará que la estabilidad de volumen,  $\bar{\Delta}L =$  constante, se deba alcanzar comparativamente mas pronto en este ensayo ASTM C 452, que en aquél, L-A, y dentro del primero en las familias cuyo cemento portland matriz conformante posea  $C_3A$ , que en las que no lo posea. Pues en estas, P-1/M 80/20, 70/30 y 60/40, P-2/M 80/20 y 70/30, P-4/M 80/20 y 70/30 y P-32/M 80/20, sobraría por estequiometría  $C_3A$  y quizás  $Al_2O_3^{r-}$ , sobre todo el primero; mientras que en aquéllos, P-2/M 60/40, P-4/M 60/40, P-32/M 80/20 y 70/30, P-31/M, P-5/M, PY-5/M, PY-1/M, PY-4/M y PY-6/M 80/20, 70/30 y 60/40, sobraría  $SO_3$ . Situaciones ambas que no permiten la formación de ettringita alguna de cualquier origen y etiología, luego las pequeñas expansiones originadas ulteriores a las edades iniciales del ensayo, deberán ser adscritas a otra causa distinta, por ejemplo hidratación de los  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$  anhidros residuales. De aquí que tal  $\bar{\Delta}L =$  constante, se haya alcanzado mas difícil y tardíamente en las probetas de las familias PY-4/M y PY-6/M, cuyo contenido teórico respectivo de  $C_3A$  es cero en ambos casos, mientras que el  $C_3S$  es notable.

Además y por otra parte, como consecuencia de tal "acción sinérgica", se podrá decir que la puzolana M en cuestión, no sólo no actúa como un  $INERTE_{RS}$  ni como un  $INERTE_{RM}$ , sino todo lo contrario, o sea, como tal puzolana en exclusiva, por provocar valores de  $\bar{\Delta}L$ , RMF, RMC y derivados respectivos en las probetas correspondientes bastante superiores a los de la actuación como un  $INERTE_{RS}$  ó  $RM$ ; debiendo ser dicha acción puzolánica, o mejor sus consecuencias, tanto mas duraderas cuanto mayor haya sido la "acción sinérgica" provocada, o sea, cuanto más adecuados hayan sido los reactivos  $n_1^o Al_2O_3^{r-}$ ,  $n_2^o C_3A$  y  $n_3^o SO_3$  ( $n_1^o$  es constante a igualdad de cemento de mezcla,  $n_3^o$  es constante en todos los casos, y  $n_2^o$  es variable en todos los casos), que lo provocaron y viceversa. De aquí que en definitiva en ausencia de "acción sinérgica" en las probetas de los cementos portland matrices conformantes respectivos solos, la formación de su ett-lf TOTAL posible correspondiente, se deba realizar mas lentamente y consiguientemente, el  $\bar{\Delta}L$ , RMF y RMC de sus probetas respectivas puede llegar, en su caso-que son la mayoría-, a superar al de su(s) cemento(s) de mezcla correspondiente(s), tanto mas pronto cuanto mayor haya sido el contenido de  $C_3A$  del mismo, y viceversa; debiendo ocurrir otro tanto pero siempre con posterioridad a la fecha anterior, con

los valores de  $\bar{\Delta}L$ , RMF y RMC, y derivados correspondientes, a si la puzolana M hubiese actuado únicamente como un  $INERTE_{RS}$  ó como un  $INERTE_{RM}$ , como así ha ocurrido en este trabajo.

Por lo tanto el impedimento del mantenimiento del ritmo de crecimiento de las probetas de cada cemento portland matriz solo, ha de ser adscrito, en todos los casos y edades de las mismas, a la acción puzolánica de la puzolana M en estos medios selenitosos, habiendo de ser, por tal motivo, dicho impedimento mas notorio y temprano cuanto mayor sea el contenido de  $C_3A$  de este último y viceversa, como así ha ocurrido en este trabajo.

Todo ello deberá hacer por tanto, que la cantidad de  $SO_4^{=}$  lcp de los cementos de mezcla de la familia P-1/M tengan que ser menores que los correspondientes a las familias PY-4/M y PY-6/M respectivamente, y entre ambos términos extremos se encontrarían los restantes, como así ha ocurrido también en este trabajo, ver Tabla 54.

De la Discusión 3ª: De los cálculos estequiométricos realizados en la discusión anterior, se dedujo que, en teoría, las probetas de los cementos de mezcla P-1/M 80/20, 70/30 y 60/40, P-2/M 80/20 y 70/30 y P-4/M 80/20 y 70/30 y P-32/M 80/20, deberían haber originado igual  $\bar{\Delta}L$ , y a partir de este valor cumplirse la generalidad denunciada de esta discusión y ocurrible con mayor aproximación únicamente a edades iniciales que no finales del ensayo.

Y ello no ha sido así, por la acción sinérgica habida entre la ett-rf y la ett-lf, en cada caso, coadyuvado por la mayor porosidad del sistema probeta de mortero ASTM C 452, que torta de pasta, L-A citada anteriormente.

No obstante tal cumplimiento aproximado, a las edades iniciales del ensayo que no a las finales, entre los cementos de mezcla PA y/o PUZ, correspondientes, del resto de las familias de los mismos preparadas con esta puzolana M y así ensayadas, indica que el cociente 
$$\frac{n_1^2 Al_2O_3^{F-} + n_2^2 C_3A}{n_3^2 SO_3}$$
, siendo  $n_1^2$  y  $n_2^2$  constantes y  $n_3^2$  variable, es de terminante de tal evento.

Y la causa por la que tal generalidad denunciada en la Discusión 3ª es tan sólo aproximada y no exacta, debe estribar en la misma por la que sus cementos portland matrices respectivos solos así ensayados, tampoco la mostraron, es decir, debido a las característi-

cas morfológicas y fisico-químicas, en particular la superficie específica, de cada uno de ellos, pues es paradójico que las clasificaciones que se obtienen en función de los valores de sus parámetros respectivos,  $\Delta\bar{L}$  y  $\bar{L}$ , de mayor a menor por este orden, a la edad de 7 días de los cementos de mezcla PA 80/20 correspondientes ensayados según el método L-A y según el método ASTM C 452-68, sean relativamente coincidentes,

L-A	$\Delta\bar{L}$	P-31 > P-2 > P-1 > P-5 > PY-1 > PY-6 > PY-4
ASTM C 452-68	$\bar{L}$	P-2 > P-1 > P-31 > PY-1 > P-5 > PY-4 > PY-6
Superficie Específica (cm <sup>2</sup> /g)		3015 3192 3248 3206 3100 3233 3287

coincidiendo todo ello con lo afirmado al respecto en el ensayo L-A y más concretamente en su interpretación final.

Y como confirmación de esta causa, superficie específica, aducida, están las familias de cementos de mezcla P-1/M y P-2/M, donde a igualdad de edad de 7 días, cemento de mezcla y agua de amasado, ha ocurrido claramente todo lo contrario a la generalidad citada, ya que,

a) mediante cálculos teóricos, con el parámetro  $\bar{L}$  y

en el caso más favorable de la familia PY-4/M, se tiene que a la edad de 7 días, si el  $\bar{L}$  de cemento PY-4 solo es 0,005%,

- el 80% de 0,005% = 0,004% de  $\bar{L}$  debido al 80% de cemento PY-4,
- el 70% de 0,005% = 0,0035% de  $\bar{L}$  debido al 70% de cemento PY-4,
- el 60% de 0,005% = 0,003% de  $\bar{L}$  debido al 60% de cemento PY-4,

luego la diferencia entre cada uno de dichos valores y el  $\bar{L}$  originado a 7 días por su cemento de mezcla PY-4/M correspondiente, habrá de ser imputado al 20%, 30% y 40%, respectivamente, de puzolana M, es decir

- 0,044% - 0,004% = 0,040% de  $\bar{L}$  debido al 20% de puzolana M
- 0,095% - 0,0035% = 0,0915% de  $\bar{L}$  debido al 30% de puzolana M
- 0,160% - 0,003% = 0,157% de  $\bar{L}$  debido al 40% de puzolana M

y trasladando tales valores a los correspondientes porcentuales derivados del cemento P-2 solo a la edad de 7 días, se tendrá que

- el 80% de 0,058% = 0,0464% de  $\bar{L}$  debido al 80% de cemento P-2
- el 70% de 0,058% = 0,0406% de  $\bar{L}$  debido al 70% de cemento P-2
- el 60% de 0,058% = 0,0348% de  $\bar{L}$  debido al 60% de cemento P-2

por tanto los  $\bar{L}$  de las probetas de los cementos de mezcla P-2/M 80/20, P-2/M 70/30 y P-2/M 60/40 deberían obtenerse

sumando ordenadamente las dos últimas tríadas de valores obtenidos, es decir,

$$\begin{aligned}\bar{\Delta}L_{7d} P-2/M \ 80/20 &= 80\% \times \bar{\Delta}L_{7d} P-2 + \bar{\Delta}L_{7d} \text{ del } 20\% \text{ puzolana } M=0,0464\%+0,040\% = 0,086\% \\ \bar{\Delta}L_{7d} P-2/M \ 70/30 &= 70\% \times \bar{\Delta}L_{7d} P-2 + \bar{\Delta}L_{7d} \text{ del } 30\% \text{ puzolana } M=0,0406\%+0,0915\% = 0,132\% \\ \bar{\Delta}L_{7d} P-2/M \ 60/40 &= 60\% \times \bar{\Delta}L_{7d} P-2 + \bar{\Delta}L_{7d} \text{ del } 40\% \text{ puzolana } M=0,0348\%+0,157\% = 0,192\%\end{aligned}$$

¡ Y tales valores no han sido los obtenidos, sino bastante mayores, 0,242%, 0,314% y 0,360%, respectivamente ! Señal inequívoca de la notabilísima acción sinérgica ocurrida en este caso; pudiéndose calificar de muy escasa para la familia P-1/M por las razones anteriormente citadas, y

b) mediante cálculos teóricos con el parámetro  $Vcl$

en el caso más favorable de la familia PY-6/M, se tiene que,

- la  $Vcl_{7d}$  debida sólo al 20% de puzolana M en las probetas del cemento de mezcla PY-6/M 80/20 debe ser,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,00357 - (0,8 \times 0,00057) = 0,003114 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  debida sólo al 40% de puzolana M en las probetas del cemento de mezcla PY-6/M 60/40 debe ser  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,01200 - (0,6 \times 0,00057) = 0,011658 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  debida sólo al 80% del cemento P-1 debe ser,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,01343 \times 0,8 = 0,010744 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  debida sólo al 60% del cemento P-1 debe ser,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,01343 \times 0,6 = 0,008058 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  teórica del cemento de mezcla P-1/M 80/20 debe ser,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,003114 + 0,010744 = 0,013858 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  real del cemento de mezcla P-1/M 80/20 es,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,01414 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  teórica del cemento de mezcla P-1/M 60/40 debe ser,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,011658 + 0,008058 = 0,019716 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  real del cemento de mezcla P-1/M 60/40 es,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,02114 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  debida sólo al 80% del cemento P-2 debe ser,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,00829 \times 0,8 = 0,006632 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  debida sólo al 60% del cemento P-2 debe ser,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,00829 \times 0,6 = 0,004974 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  teórica del cemento de mezcla P-2/M 80/20 debe ser,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,003114 + 0,006632 = 0,009746 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  real del cemento de mezcla P-2/M 80/20 es,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,03457 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  teórica del cemento de mezcla P-2/M 60/40 debe ser,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,011658 + 0,004974 = 0,016632 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día,}$
- la  $Vcl_{7d}$  real del cemento de mezcla P-2/M 60/40 es,  $(\frac{a}{c} = d)$ :  $0,05143 \bar{\Delta}L \text{ (\%)/día.}$

Y la acción sinérgica en cada caso, se mediría por la diferencia, a igualdad de cemento de mezcla, de la  $V_{cl,7d}$  real y teórica de sus probetas respectivas, de aquí que,

- en las probetas del cemento de mezcla P-1/M 80/20 la diferencia entre la  $V_{cl}$  teórica y real, obtenida, ha sido  $0,000560 \Delta L(\%)/día$
- idem P-1/M 60/40, ha sido ...  $0,001424 \Delta L(\%)/día$
- idem P-2/M 80/20, ha sido ...  $0,024824 \Delta L(\%)/día$
- idem P-2/M 60/40, ha sido ...  $0,034798 \Delta L(\%)/día$

es decir, paradójicamente, las probetas de los cementos de mezcla P-2/M 80/20 y P-2/M 60/40, respectivamente, tienen una acción sinérgica bastante superior a las homónimas correspondientes P-1/M 80/20 y P-1/M 60/40, pues,

- en los cementos de mezcla 80/20, resultó ser el,  $\Delta L(\%)/día$  del P-2/M 80/20  $\gg \Delta L(\%)/día$  del P-1/M 80/20, o sea,  $0,024824 \Delta L(\%)/día \gg 0,000560 \Delta L(\%)/día$ , (45 veces mayor),
- en los cementos de mezcla 60/40, resultó ser el  $\Delta L(\%)/día$  del P-2/M 60/40  $\gg \Delta L(\%)/día$  del P-1/M 60/40, esto es,  $0,034798 \Delta L(\%)/día \gg 0,001424 \Delta L(\%)/día$ , (14 veces mayor), y
- en los cementos de mezcla 70/30, intermedia entre ambas anteriores,

lo cual contrasta notoriamente con lo que teóricamente debería haber sido, por estequiometría, dado el mayor contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz P-1, 14,11%, sobre el P-2, 11,09%, y consiguientemente el de los cementos de mezcla PA y PUZ del primero sobre los correspondientes del segundo.

De aquí que, en definitiva y, según todo lo anterior, tan notabilísimo contraste entre lo real y lo teórico, obligatoriamente haya de ser achacable, entre otros, al tamaño de grano-finura de molido ó superficie específica de ambos cementos portland matrices P-1 y P-2 que también tan apreciablemente los diferencia,  $3.192 \text{ cm}^2/\text{g}$  y  $3.015 \text{ cm}^2/\text{g}$ . respectivamente, en favor del primero, el P-1, y en detrimento de su acción sinérgica correspondiente, como ha quedado demostrado. Ver pág. 481.

Y todo ello sin olvidar además, la competitividad manifiesta existente entre el  $C_3A$  y el  $Al_2O_3^-$  que le acompañe, en cada caso, por la fijación del 7,0% de  $SO_3$  inicial (como ya se dijera aquí antes, y en similar situación en el método L-A), la cual, al ser constante, a igualdad de cemento de mezcla, para la de este último origen,  $Al_2O_3^-$ , deberá a) magnificarse, con el aumento,

- del contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante, y
- del grado de finura de molido ó superficie específica del mismo, y

b) minimizarse, en caso contrario,

con las consecuencias tecnológicas- distintos  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$  -, correspondientes.

De aquí que en el primer caso a), ello deberá conducir ineludiblemente, y desde el instante inicial del amasado, a un mayor consumo del 7,0% de  $SO_3$  original, por parte del  $C_3A$  respectivo - y consiguientemente a una mayor formación de  $ett-lf$ , no, al parecer, lo suficientemente nociva por deberse de formar en el estado plástico del mortero -, en detrimento de las disponibilidades por parte del  $Al_2O_3^{r-}$ , el cual en tal caso, podría disponer de menor cantidad de áquel para sus fines inmediatos respectivos; debiendo originar por tanto menor cantidad de  $ett-rf$  que la que pudiera en situación más favorable, y consiguientemente menores  $\bar{\Delta}L$  rápidos iniciales en las probetas correspondientes, y viceversa. Y como dato confirmativo premonitorio está el hecho de los mayores valores en la relación  $\frac{a}{c} = d$  alcanzados por las probetas de los cementos de mezcla 80/20, - 70/30 y 60/40, de la familia P-1/M sobre los correspondientes a las probetas de la familia P-2/M (0,58, 0,60 y 0,61 contra 0,54, 0,55 y 0,56, respectivamente); ello por tanto deberá conllevar igual relación en los valores correspondientes de porosidad - lo contrario en los de  $Vu$  -, y  $SO_4^{2-}$  residual en los líquidos de conservación, a la edad de 7 días (más que ninguna otra), de las probetas respectivas, lo cual se deberá traducir en la facilitación de una mayor formación de  $ett-lf$ , hasta al menos la edad de 7 días, que por el estado aún no suficiente endurecido del mortero (ya para entonces en forma de probeta), serían "acomodados" más y mejor sus efectos expansivos y consiguientemente sus valores de  $\bar{\Delta}L$  correspondientes menguados, y viceversa, como así ha ocurrido en este trabajo que a tal edad de 7 días (la que marcará el "valor de  $\bar{\Delta}L$  de salida" de la probeta) y a igualdad de cemento de mezcla, las probetas de los cementos de mezcla de la familia P-2/M, han originado mayores  $\bar{\Delta}L$  que sus homónimos de P-1/M, es decir en aquellas ha habido una mayor acción sinérgica que en éstas. De donde se deduce que para obtener en este ensayo la máxima acción sinérgica en cementos de mezcla PA y PUZ, es necesario que el cemento portland matriz acompañante respectivo de la puzolana aluminica o similar posea un ADECUADA superficie específica acorde con su disponibilidad de  $C_3A$ , para tal fin, y que para el caso que nos ocupa de cementos portland de contenido elevado y aproximado de  $C_3A$ , deberá ser, al parecer, la mínima posible desde el punto de vista tecnológico.



Mientras que en el segundo, b), al minimizarse hasta prácticamente anularse la competitividad de origen  $C_3A$ , por ausencia del mismo, caso de las familias PY-4/M y PY-6/M, la expansividad originada en las mismas, desde la edad inicial, ha de ser debida al  $Al_2O_3^{F-}$  en cada caso y mas concretamente a su  $ett-rf$  respectiva con sus consecuencias expansoras consiguientes, de aumento con la adición de puzolana. Lógicamente en este caso la sup. espf. del PY-4 y PY-6 debería de ser la máxima posible por la razón contraria (caso del PY-1).

Por otra parte, el que los  $\Delta L$  de las probetas de la familia de cementos de mezcla P-1/M sean, a partir de la edad de 14 días y hasta el final del ensayo, notablemente menores que los correspondientes a su cemento portland matriz P-1 sólo (en el resto de matriz P) no debe dar pie para pensar que la puzolana M tiene un efecto protector ó "anti-sulfato", a como lo hicieran las silícicas D y N, aunque por distinto motivo, pues el mismo es mas engañoso que real por la acción sinérgica antes apuntada y sus consecuencias de consumo rápido y total del 7,0% de  $SO_3$  puestas inicialmente como agresivo. Y como confirmación de este comportamiento "anti-sulfato" FALSO de la puzolana M, están los resultados que se estudiarán mas adelante, ver Tabla 73, correspondientes obtenidos en las probetas del cemento de mezcla P-1/M 60/40 ensayado según el método H-1, el cual utiliza el 21,0% de  $SO_3$ , es decir, tres veces más que en este método de ensayo ASTM C 452, y donde según el supuesto FALSO anterior el efecto "anti-sulfato" de dicha puzolana M, en las probetas del tal cemento de mezcla P-1/M 60/40, debería ser el máximo posible de entre todas sus probetas hermanas. Pues bien puede comprobarse, ver Tabla 73, que las probetas de la misma se auto-destruyeron por ataque selenitoso severísimo a la edad de 180 días, lo cual viene a confirmar la FALSEDAD del supuesto anterior; mientras que por el contrario las correspondientes a las puzolanas silícicas "anti-sulfato" D y N, continuaron impertérritas hasta el final del ensayo, ver Tabla 73.

De la Discusión 4ª: Ello lógicamente ha de ser una consecuencia derivada de la interpretación anterior, pues tanto si se consume, en su caso todo el 7,0% de  $SO_3$  inicial, como si no, el mismo se verifica generalmente con relativa rapidez por la acción sinérgica resultante mencionada, de aquí que las probetas de cualquiera de los cementos de mezcla PA ó PUZ, con prontitud tengan un crecimiento prácticamente nulo, o sea a partir de las edades, de 7 a 14 días en adelante.

De la Discusión 5ª: Ello puede deberse a la misma razón apuntada para el caso de las puzolanas silícicas D y M, pero con efectos diferentes y resultados contrarios, ya que aquí al aportar el cemento matriz PY-6 mas  $SC_3$  que el PY-4, la ettringita se podrá formar mas y mejor, en los cementos de mezcla del primero que en los del segundo, lo cual redundaría, con la acción sinérgica correspondiente, en una mas completa y rápida acción col-matadora de la misma durante el fraguado y endurecimiento totales de las probetas y por lo tanto una mejor acomodación sin perjuicio para el resto de la masa del mortero de aquellas, las cuales originarían unos  $\delta l$  algo menores.

De la Discusión 6ª: Probablemente ello se deba a que:

- 1ª.- Todo cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con esta puzolana M, puede formar en potencia, una cantidad de ettringita TOTAL, suma de la ettringita y ettringita posibles correspondientes.
- 2ª.- La ettringita TOTAL se forma en todos los casos desde el instante mismo del amasado de los materiales, continuando durante la conservación en C.H., desenmoldado con forma de probetas e inmersión de las mismas en su agua de conservación correspondiente, aunque la mayor parte durante esta última fase).
- 3ª.- La ettringita TOTAL posible, en cada caso, es la suma de la formada durante el periodo del amasado, curado y desenmoldado de las probetas hasta el instante inmediato anterior a su inmersión, ó ettringita de la 1ª fase, mas la formada desde la inmersión de las mismas en su agua de conservación correspondiente, ó edad inicial del ensayo, hasta la edad final del mismo de 730 días, ó ettringita de la 2ª fase, es decir, -  
ettringita TOTAL = ettringita 1ª fase + ettringita 2ª fase = -  
(amasado, curado, desnm.) (inmersión en  $H_2O$  dda.)  
= constante.
- 4ª.- Lógicamente para que la suma anterior se haya de mantener constante, cualquier aumento en la ettringita de la 1ª fase implica obligatoriamente una disminución en la de la 2ª fase, y viceversa.
- 5ª.- La ettringita de la 1ª fase debe ser proporcional a la cantidad de agua de amasado empleada, de aquí que al haber sido la relación  $\frac{a}{c} = "d"$  mayor que la relación  $\frac{a}{c} = "c"$ , la de aquél origen deberá haber sido mayor que la de éste y viceversa, debiéndoles de ocurrir todo lo contrario a sus ettringitas de la 2ª fase respectivas.

De aquí que al ser la ettringita 1ª fase "d", mayor que la ettringita 2ª fase "c", y formarse durante el fraguado y endurecimiento de la probeta, habrá de ser mas acomodaticia, colmatadora y menos perjudicial, dejando menos ettringita 2ª fase "d", para poder formarse una vez sumergida la probeta en su agua de conservación, y ocurriendo todo lo contrario con la de origen "c". Por lo tanto los  $\bar{A}L$  originados por la ettringita 2ª fase "c", han de ser, a igualdad de edad, mayores que los correspondientes originados por la ettringita 2ª fase "d", como así ha ocurrido en este trabajo.

Y lógicamente esta interpretación anterior será tanto mas válida cuanto menor tamaño de grano(+finura) posean los materiales correspondientes, ó lo que es lo mismo, cuanta mayor finura de molido posea el cemento portland matriz conformante respectivo sólo,

, y viceversa, como así también ha ocurrido en este trabajo.

Por último y antes de finalizar, aprovechando los resultados obtenidos en este apartado mediante esta puzolana M, se desea confirmar el aserto generalizado existente sobre que TODA la  $Al_2O_3^{r-}$  de un metacaolín muy puro no se encuentra como  $Al_2O_3^{r-}$  sino tan sólo una pequeña parte, alrededor de un 2,08%, como ya se dijera en la POP, utilizando para ello los valores obtenidos de  $\bar{A}L$  de las probetas preparadas con la puzolana M y así ensayadas, y los valores de  $SO_4^{=}$  de su líquido de conservación respectivo: Así pués, aceptando por buena la hipótesis falsa de que toda la  $Al_2O_3$  de un metacaolín es reactiva, el que nos ocupa, empleado en este trabajo como puzolana M, posee un 23,11% de  $Al_2O_3^{r-}$ , la cual en el supuesto falso citado,

- a un cemento de mezcla PA 80/20 le aportaría	23,11% x 20% = 4,622%	$Al_2O_3^{r-}$
- " " " " " PUZ 70/30 " "	23,11% x 30% = 6,983%	$Al_2O_3^{r-}$
- " " " " " PUZ 60/40 " "	23,11% x 40% = 9,244%	$Al_2O_3^{r-}$

las cuales necesitarían respectivamente por estequiometría, un 10,42%, 15,63% y 20,84% de  $SO_3$  para poder pasar a ett-rf, cantidades todas ellas mayores del 7,0% puesto en los tres casos como agresivo común. De aquí que en tales casos:

- sólo un 3,10% de  $Al_2O_3^{r-}$  pasaría a ett-rf, quedando el 1,522%, 3,883% y 6,144% de  $Al_2O_3^{r-}$  restante como tales, o mejor sus hidratos correspondientes,
- el 7,0% sería consumido en su totalidad en los tres casos, no quedando nada para poder ser consumido o fijado por el  $C_3A$  de la fracción cemento portland acompañante respectivo,

- c) la cantidad de ett-rf, sería común para los tres, es decir, 37,10%,
- d) en TODAS las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con esta puzolana M y así ensayados, se habría originado, a igualdad de edad, LA MISMA EXPANSION, tenga, ó no,  $C_3A$  el cemento portland matriz acompañante respectivo, y
- e) en todos los líquidos de conservación correspondientes a las probetas anteriores se habría obtenido un mismo valor de  $SO_4^{2-}$  próximo ó muy próximo a la solubilidad de la ettringita en disolución saturada de  $Ca(OH)_2$ .

¡ Y nada de eso ha ocurrido, sino todo lo contrario !. De aquí que se confirme la FALSEDADE de la hipótesis primitiva, certificando de este modo la certeza del aserto generalizado conocido.

Finalmente véase la parte correspondiente de lo dicho a propósito de esta puzolana M al final de la interpretación VIII.1.2.2.2 (E) y (F).

#### Interpretación VIII.2.2.2.3 (G)

De la Discusión 1ª y 2ª: Al tener que ser en este caso la ett-T que se puede formar suma de la ett-rf y ett-lf (a diferencia de lo que ocurriera con los casos anteriores estudiados hasta el momento y en especial el de los cementos portland matrices P y PY solos, en que mayoritariamente, toda ella era ett-lf, o sea, de origen  $C_3A$  y/o  $C_4AF$ , sobre todo el primero), y ser sus velocidades de formación respectivas, según la conclusión VII.4.2, 9ª (POP) y la interpretación VIII.1.2.2.2, (L-A), diferentes, es decir,  $V_f \text{ ett-rf} \gg V_f \text{ ett-lf}$ , lógicamente no deberá de sincoparse desde el origen su formación respectiva, por lo que ni los mínimos de porosidad de sus probetas respectivas a las edades iniciales del ensayo podrán ser siempre los menores de todo el ensayo, ni los máximos correspondientes tampoco como ocurriera en los casos citados que se encuentran dentro del paréntesis último.

Lo que si es cierto es que por ser la  $V_f \text{ ett-rf} \gg V_f \text{ ett-lf}$ , podrá ser quizás la ett-rf mas colmatante, y quizás endurecedora que la ett-lf, como ya se dijera en la interpretación VIII.1.2.2.2, (L-A), y como así lo confirman sus elevados valores a las edades iniciales del ensayo, 21 y 28 días, de RMC y RME correspondientes; de aquí que cuando llegue a formarse en mayoría y con posterioridad, esta última, o sea, la ett-lf, pese a que por estequiometría es menor en cantidad que la de su cemento portland matriz correspondiente solo (para el caso del P-1, sería = 29,00 g. de  $C_3A$  del cemento P-1 solo, de los 51,78 g de  $C_3A$  totales que posee, darían ett-lf  $\gg$  17,18 g.  $C_3A$  de la

fracción del cemento matriz P-1 del cemento PA, P-1/M 80/20, que dan ett-lf > 18,05 g. de  $C_3A$  de la fracción de cemento matriz P-1 del cemento PUZ, P-1/M 70/30, que dan ett-lf > 18,87 g. de  $C_3A$  de la fracción de cemento matriz P-1 del cemento PUZ, P-1/M 60/40, que dan ett-lf), su efecto disruptivo podría ser mas notable por haberse efectuado en un sistema mas endurecido, y consiguientemente la porosidad por ella provocada en su probeta, mayor, como así ha debido ocurrir en este trabajo al aumentar la porosidad, a igual edad, con la adición de la puzolana M.

También podría ser achacable tal aumento de poros con la adición de puzolana M, al aumento en tal sentido de la relación  $\frac{a}{c} = d$  dentro de los miembros de una misma familia, y ello en todas las familias, pues como se sabe la porosidad aumenta comunmente con aquella. No obstante y como se verá mas adelante, esta hipótesis no resultará válida para el caso de las puzolanas O y A donde ocurre todo lo contrario, es decir, que mientras la relación  $\frac{a}{c} = d$  disminuye con la adición de la puzolana, la porosidad aumentó, lo cual va en contra de la misma y en favor de la primera expuesta. En este caso el proceso, en su conjunto, podría constar con mayor o menor aproximación de un "montaje o entramado reticular espaciado (mejor poroso en la realidad)" en todo el sistema cementante al formarse la ett-rf a mayor velocidad quizás que la propia de endurecimiento del mismo y quedando por tanto aquella "aprisionada" por éste. A continuación se produciría el "rellenado" de todo el sistema reticular anterior por ett-lf, que para entonces viene formándose mas lentamente, hasta llegar a un valor mínimo de porosidad tras el cual la expansividad de la ett-lf por formar aún ó residual, lo haría aumentar hasta el valor máximo de porosidad correspondiente, con lo que a continuación y tras el cual se produciría un nuevo y final relleno de poros al igual que ocurriera en idéntico estadio a sus cementos matrices solos y a los de mezcla con puzolanas D ó N.

De la Discusión 3ª y 4ª: La consecución de valores de porosidad relativamente parecidos, desde el origen, y a igualdad de cemento de mezcla, sea cual fuere su cemento portland matriz, unido al hecho de la constancia común de la cantidad de puzolana presente en cada cemento de mezcla citado, dan pie a pensar que aquellos deben de estar relacionados con la cantidad de ett-rf respectiva formada en cada caso, así como también que al ser desde el origen su al parecer gran velocidad de formación sobre la de la ett-lf, ha de

jugar un relevante papel a modo de "gen mensajero" ó similar que "marcará y caracterizará a su probeta" en su génesis, bastante mas que lo pudiera hacer por tal motivo la ett-lf, tanto sola como en coyunda con aquella, como lo confirma el hecho de no haber ocurrido otro tanto cuando esta última estuvo presente en exclusiva en los cementos P y PY solos, así como también el hecho de que ésta acaba por "completar, en su caso, la obra que inició aquélla", es decir, llenar poros. De aquí que cuando estuvo presente, se llegó a alcanzar en todos los casos a edades intermedias del ensayo un mínimo de porosidad el cual era, en general, tanto menor cuanto mayor fue el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz, es decir, cuanta mas ett-lf se pudo originar.

Por otra parte la constancia de valores de porosidad determinados mediante ésta técnica experimental y alcanzados a igualdad de cemento de mezcla es mas achacable a la puzolana M añadida en cada caso, que a su fracción de cemento portland matriz respectivo. Y para que ello ocurra de esta manera la Vf de la ett-rf ha de ser superior, según tales valores obtenidos de este parámetro, a la Vf de la ett-lf.

#### Interpretación VIII.2.2.2.3 (H)

De la Discusión 1ª: Lo ocurrido en este caso con este parámetro podría deberse,

- o bien a que para entonces parte de la ett-T formada pasa a fase AFm que al ocupar un menor volumen puede aumentar la porosidad y consiguientemente disminuir la Vu,
- o bien a que para entonces (= de 545 a 730 días) al descender el pH de la fase líquida por debajo del necesario, 10,8, para mantener la estabilidad de la ettringita formada, y en especial el de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ de cemento portland matriz acompañante con  $C_3A$  (generalmente el de los cementos de mezcla PA 80/20 no, excepto dos excepciones, y comunmente el de los cementos de mezcla PUZ hermanos 70/30 y 60/40 si, excepto tres excepciones), aquella tendería a desaparecer originando en este caso  $C_xA_yH_z$  de menor volumen molecular que la fase AFm y por tanto desiguales y más acusados resultados que antes o sea una disminución en los valores de la Vu correspondientes, como ha ocurrido en este trabajo.
- o bien a ambas anteriores en mayor o menor medida.

De la Discusión 2ª: Vale aquí íntegramente idéntica interpretación dada para el mismo caso en el parámetro porosidad.

De la Discusión 3ª: Ello muy probablemente se debe a que en las primeras edades del ensayo los poros de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ PY-4/M 80/20, 70/30 y 60/40 sólo se rellenan

con ett-rf, mientras que las de los P-1/M 80/20, 70/30 y 60/40, se rellenan sinérgicamente con ett-rf y ett-lf con sus mayores consecuencias expansivas y colmatantes correspondientes, y valores de  $V_{cl}$  respectivos como así ha ocurrido en este trabajo.

Por el contrario y a edades posteriores, al no haberse podido originar quizás en esta única familia P-1/M o solo algun(os) componentes de ella, toda la ett-lf en las edades iniciales (pese a la acción sinérgica existente), ésta lo haría ya como ett-lf 2<sup>ria</sup> o sea disruptivamente, aumentando los poros, disminuyendo ligeramente o no la  $V_u$ , que dejará de serlo en cuanto el cemento portland matriz acompañante aporte una cantidad suficiente de  $C_3A$  que haga que todo él pase en el mejor de los casos a ett-lf 1<sup>ria</sup>, en cuyo caso el aumento de  $V_u$  no debía ser sinuoso, de aquí que tal hecho sólo se haya producido en las familias de cementos de mezcla PA y PUZ restantes y no en la P-1/M.

Todo lo anterior se puede confirmar además y en cierta medida por el contenido de  $SO_4^{=}$  lcp, pues en los tres casos aún debe de existir a partir de las edades de 21 ó 28 días  $SO_3$  residual del 7,0% inicial para reaccionar con el  $C_3A$  restante en su caso, de modo y manera que según dicho probable contenido de  $C_3A$  residual:

1<sup>a</sup>.- Los valores de  $SO_4^{=}$  lcp en las tres familias de cementos de mezcla PA y PUZ comparadas anteriores a partir de las edades de 21 ó 28 días, no deberán ser similares entre sí (0,076 a 0,064 en el P-1/M 80/20, 0,069 a 0,059 en el P-1/M 70/30 y 0,032 a 0,021 en el P-1/M 60/40; 0,272 a 0,204 en el PY-4/M 80/20, 0,17 a 0,084 en el PY-4/M 70/30 y 0,102 a 0,081 en el PY-4/M 60/40; 0,263 a 0,197 en el PY-6/M 80/20, 0,134 a 0,112 en el PY-6/M 70/30 y 0,085 a 0,066 en el PY-6/M 60/40) ya que de origen los cementos de mezcla de la familia P-1/M han debido consumir más  $SO_3$  del 7,0% inicial que sus homónimos de las familias, PY-4/M y/o PY-6/M respectivamente, 0,102, 0,088 y 0,071 g  $SO_3$ /l, para los P-1/M 80/20, 70/30 y 60/40 respectivamente; 0,407, 0,489 y 0,223, idem PY-4/M; 0,401, 0,316 y 0,177, idem PY-6/M), como así ha ocurrido en este trabajo.

2<sup>a</sup>.- Los valores de  $SO_4$  lcp a continuación de dichas edades anteriores, pese a ser menores, deben ser aún los suficientes para si existe aún  $C_3A$  residual poder originar ett-lf ya para entonces disruptiva, lo cual se debería traducir en un aumento de la porosidad y consiguientemente una disminución en la  $V_u$ , como así ha ocurrido en el caso de los cementos de mezcla PA y PUZ de la familia P-1/M que no en los de las familias PY-4/M y/o PY-6/M donde deberá ocurrir todo lo contrario, como así ha sido. De aquí

que por de contra a tales edades y para estas últimas familias citadas, los contenidos de  $\text{SO}_4^{2-}$  lcp deberán ser mayores que en aquellas (a 730 días: 0,005, 0,004 y 0,000 g  $\text{SO}_3$  /l para los P-1/M 80/20, 70/30 y 60/40 respectivamente, 0,027, 0,020 y 0,020 para los PY-4/M y 0,026, 0,015 y 0,012 para los PY-6/M).

#### Interpretación VIII.2.2.2.3. (I)

Unicamente se va a demostrar una vez más por su interés, la existencia de la "acción sinérgica" entre la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la puzolana M y el  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento P ó PY en su caso que la acompañe, y con ello el que esta puzolana M actúa únicamente como tal puzolana y nada en absoluto como  $\text{INERTE}_{\text{RS}}$  ni como  $\text{INERTE}_{\text{RM}}$ , a partir de la edad de 7 días.

Para ello se van a estudiar dos supuestos:

1º supuesto: Caso de que los cementos PY-6 y PY-4 NO TIENEN NADA EN ABSOLUTO DE  $\text{C}_3\text{A}$ , como dice la teoría de Bogue, y por tanto no fijarán  $\text{SO}_3$  del 7,0% inicial para dar ett-lf.

2º supuesto: Caso de que los cementos PY-6 y PY-4 tienen muy poco de  $\text{C}_3\text{A}$ , pese a lo que dice la teoría de Bogue, y por tanto fijarán muy poco  $\text{SO}_3$  para dar ett-lf.

Desarrollo del razonamiento:

1º supuesto: Si tal es el caso, el  $\text{SO}_4^{2-}$  lcp habría de ser exactamente - igual tanto si el cemento portland PY está solo como si está acompañado de un 20% de  $\text{inerte}_{\text{RS}}$  (de igual forma al 20% de cemento PY sustituido) es decir,  $\text{SO}_4^{2-}$  lcp del cemento PY-4 solo es 0,7210 g  $\text{SO}_3$  /l, y  $\text{SO}_4^{2-}$  lcp del cemento de mezcla PY-4/ $\text{inerte}_{\text{RS}}$  80/20 debe ser 0,7210 g  $\text{SO}_3$  /l; sin embargo ha sido 0,4072 en el caso de la puzolana M, luego dicho 20% de puzolana M ha sido la causante de que el 0,7210 descienda a 0,4072; por tanto dicha fracción 20% de puzolana M habrá fijado  $0,7210 - 0,4072 = 0,3138$  g  $\text{SO}_3$  /l. Y del mismo modo, en el caso del cemento PY-6 se tendrá:  $0,6114 - 0,4008 = 0,2106$  g  $\text{SO}_3$  /l; por lo que tomando el valor medio de ambos casos posibles se tendría que el 20% de M fijaría ella sola 0,2622 g  $\text{SO}_3$  /l. Pues bien, razonando igualmente para el caso del cemento portland matriz acompañante P-1 (con 14,11% de  $\text{C}_3\text{A}$ ) solo, y en su cemento de mezcla P-1/M 80/20 se tendrá:

- Si la puzolana M actuase como un  $\text{inerte}_{\text{RS}}$ , en el liq. de conservación habría  $\frac{0,4710 \times 100}{80} = 0,58875$  g  $\text{SO}_3$  /l, y

- Si la puzolana M no actuase como un  $\text{inerte}_{\text{RS}}$  y si como tal puzolana, -



dejaría libre  $0,58875 - 0,2622 = 0,3266 \text{ g. SO}_3/\text{l.}$

¡Y eso no ha ocurrido! Ya que en la realidad ha quedado libre menos  $\text{SO}_3$ , o sea  $0,1021 \text{ g SO}_3/\text{l.}$ , es decir tres veces menos, lo cual indica una vez más la existencia de una "acción sinérgica" entre la  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de la fracción M y el  $\text{C}_3\text{A}$  de la fracción P, como se dijo en el L-A, y además que la misma aumenta del 80/20 al 60/40 y al 70/30 puesto que operando de igual modo para ambos cementos de mezcla se tiene:

$$\left( \frac{0,4710 \times 100}{70} \right) - \frac{(0,7210-0,4895)+(0,6114-0,3156)}{2} = 0,4092 \gg 0,0875$$

$$\left( \frac{0,4710 \times 100}{60} \right) - \frac{(0,7210-0,2225)+(0,6114-0,1770)}{2} = 0,3185 \gg 0,0711$$

$$0,3266 - 0,1021 = 0,2245 \Rightarrow 80/20$$

$$0,4092 - 0,0875 = 0,3217 \Rightarrow 70/30$$

$$0,3185 - 0,0711 = 0,2474 \Rightarrow 60/40$$

es decir, que según el método L-A, la máxima acción sinérgica se consigue en el cemento de mezcla 60/40, y según este parámetro de este método ASTM C 452 se consigue en el 70/30 hermano.

2º supuesto: En este supuesto no se puede precisar la cantidad de  $\text{SO}_3$  del 7,0% inicial que la fracción M fijaría por si sola en cada cemento de mezcla de cemento portland matriz acompañante PY-4 ó PY-6, de aquí que haya de centrarse en exclusiva en los correspondientes al cemento portland matriz acompañante P-1 en cuyo caso

Cemento de Mezcla	Cantidad de $\text{SO}_3$ que le p. (g. $\text{SO}_3/\text{l.}$ )		g. $\text{SO}_3/\text{l.}$ fijados con
	P-1/Inerte <sub>RS</sub>	P-1/M	
80/20	$\frac{0,4710 \times 100}{50} = 0,9420$	0,1021	0,8399 ..... 20% de M
70/30	$\frac{0,4710 \times 100}{70} = 0,6729$	0,0875	0,5854 ..... 30% de M
60/40	$\frac{0,4710 \times 100}{60} = 0,7850$	0,0711	0,7139 ..... 40% de M

es decir, a más puzolana M añadida, más se fija de su cantidad teórica P-1/Inerte<sub>RS</sub> correspondiente, lo cual indica también que hay sinergismo, pero en este caso en el cemento de mezcla 60/40, más que en el 70/30, como en el método L-A.

No obstante, tanto en un supuesto como en otro ello no deberá preocuparnos, pues en definitiva habrán de ser lógicamente los valores de los parámetros RMC y RNF e  $\Delta\text{L}$ , en su caso, quienes dilucidan en que mezcla de cada familia se origina la acción sinérgica máxima ó adecuada a cada caso.

Por lo tanto, todo ello confirma el notable efecto puzolánico de esta puzolana M (y similares), en estos cementos de mezcla PA y PUZ preparados con ella, la cual no protege en absoluto contra la acción de los iones sulfato, pero en cambio origina unos valores de RNF y RMC a edades iniciales muy considerables y siempre mayores que los correspondientes a su cemento portland matriz acompañante P ó PY solo.

Finalmente del compendio global de esta interpretación se comprende fácilmente como, a igualdad de edad inicial del ensayo (de 7 a 28 días), cemento de mezcla y agua de amasado  $d$ , mejor que la  $c$  aún, las probetas de cualquier cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con esta puzolana  $M$  han mostrado, por lo general, un  $\bar{\Delta}L$  mayor que las de su cemento portland matriz acompañante solo, aumentando la diferencia entre ambos valores de  $\bar{\Delta}L$  homónimos (disminución de RS) con el aumento del contenido de  $C_3A$  de éste, disminución de su superficie específica y aumento de puzolana  $M$ , y viceversa, manteniéndose prácticamente en todos los casos de mezcla y durante el resto de las edades del ensayo el valor del  $\bar{\Delta}L$  alcanzado en las iniciales del mismo.

Del mismo modo se comprende el que por lo general en este método de ensayo, y a diferencia del L-A, interpretación VIII.1.2.2.2., la menor espectacularidad inicial derivada de la expansividad y nocividad de la ett-rf originada por la  $Al_2O_3^r$  de las puzolanas (fundamentalmente las aluminosilícicas y aluminicas), con o sin la de la ett-lf correspondiente, se debe,

- a la menor cantidad inicial de agresivo utilizada en este método de ensayo ASTM C 452, con 7,0%, que en áquel, L-A, 15,5%, la cual
- se minimiza hasta anularse prácticamente tanto más pronto cuanto mayores sean las cantidades de  $Al_2O_3^r$  y  $C_3A$  competidores en la fijación de la misma, es decir cuanto más aluminica sea la puzolana y celítico el cemento portland que la acompañe, y viceversa.

Ello traerá consigo, el que en tal caso de puzolana aluminica, al fijar mayormente la misma el 7,0% de  $SO_3$ , por la mayor Vf de su ett-rf derivada, no dejará el necesario para que su escasa  $Al_2O_3^r$ -residual, y sobre todo la de  $C_3A$  del cemento portland que la acompañe, pueda originar su ett-lf y mostrar de este modo también su correspondiente nocividad, hecho que no ocurriría en la ausencia de aquella, véase Tablas 17 y 26. Con lo cual las probetas del cemento de mezcla de ambas, no podrán mostrar al final del ensayo TODO o la mayor parte del  $\bar{\Delta}L$  que debieran, y si en cambio y aunque rápidamente, una mínima parte de la misma. Por tanto y en cierta medida se puede considerar que este método de ensayo ASTM C 452 enmascara la posible nocividad de una puzolana aluminica y a más aluminica mayor enmascaramiento, no pudiéndose decir que ocurre lo mismo en igual caso con el método L-A, de aquí una justificación más de la necesidad de la hibridación realizada de ambos que ha dado por consecuencia el método H-1 empleado en este trabajo.

Igualmente se comprende como la acción puzolánica de este tipo tan específico de puzolanas, M, en estos medios portlandíticos y selenitosos, es según los parámetros aquí utilizados, el de formar ett-rf tan velozmente que su expansividad característica, al verificarse cuando aún no están lo suficientemente fraguadas y endurecidas las probetas correspondientes, no resultará ser tan nociva para las mismas como realmente debiera, beneficiándose de aquella en cierta medida tales fraguados y endurecimientos citados. De aquí que la nocividad inherente a la expansividad de la ettringita sea más achacable al grado de endurecimiento del entorno en que se forma que a la propia expansividad en si de la misma, pues al parecer, según fuese aquél, podría tornarse en "coadyuvante o constructiva (colmatante)", en lugar de "disgregante o destructiva (no colmatante)". Por lo tanto se puede decir con fundamento que sobre todo a las edades iniciales del ensayo, tanto la ett-rf como la ett-lf, por su acción sinérgica correspondiente en cada caso, son expansivas y colmatantes al mismo tiempo.

Por otra parte y en relación con el trabajo expreso de Matousek y Sauman (184) titulado "Contribution to the Hydration of Expansive Cement on the Basis of Metakaolinite", se puede decir que en vista de que la evolución durante todo el ensayo de los valores de EXPANSION (mm/m) obtenidos por los mismos de sus probetas preparadas con,

- metacaolín "Sedlec", de 0% a 30%, en peso,
- yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), de 0 a 25%, en peso,
- cemento portland (69,4%  $\text{C}_3\text{S}$ , 9,1%  $\text{C}_2\text{S}$ , 9,7%  $\text{C}_3\text{A}^*$  y 7,0%  $\text{C}_4\text{AF}$ ), la diferencia hasta 100% en cada caso, en peso, y
- (a/c) = 0,4

tanto,

- a igualdad de adición de yeso, 10% (ó 4,65%  $\text{SO}_3$ ), en peso, y adición de metacaolín "Sedlec" variable de 0% al 30%, en peso, como
- a igualdad de adición de metacaolín "Sedlec", 10%, y adición de yeso variable de 0% a 25% (11,6%  $\text{SO}_3$ ), en peso

ha sido, en fundamento, idéntica a la obtenida mediante los valores de  $\bar{\Delta L}(\%)$ , de las probetas de 1"x1"x11½" de

- . mortero ASTM C 452, (con 7,0% de  $\text{SO}_3$  en la mezcla-conglomerante cemento más yeso)
- . mortero H-1 (con 21,0% de  $\text{SO}_3$  en la mezcla-conglomerante cemento más yeso), e
- $\Delta\phi(\%)$ , de las tortas de 80 x 30 mm de pasta hidratada selenitosa (15,5%  $\text{SO}_3$ ) L-A

de este trabajo, y en especial los de las probetas preparadas con la puzolana M (metacaolín) en forma de cementos de mezcla 80/20 (20% en peso de M), y 7,0% de  $SO_3$ , viéndose refrendada aún más tal coincidencia de fundamento mediante los correspondientes a,

- los cementos de mezcla hermanos con 30% y 40% en peso de metacaolín M, es decir, mediante los 70/30 y 60/40 correspondientes también con 7,0% de  $SO_3$ , y
- los valores de los parámetros RMF, RMC,  $\Delta$ RMF,  $\Delta$ RMC,  $Vc\Delta$ RMF y  $Vc\Delta$ RMC, respectivos,

los cuales y en especial estos últimos - que al igual que los de  $\bar{\Delta}L$  homónimos han sido notablemente elevados, véase Tablas 48, 49, 50, 51 y 28, a las edades iniciales del ensayo y a más inicial mejor, respecto de los correspondientes a su cemento portland matriz constitutivo P ó PY solo, mayormente respecto a este último -, vienen a confirmar la intencionalidad de los anteriores autores citados de poder preparar Cementos Expansivos con metacaolín en un medio portlandfítico y selenitoso apropiados - 6,975% de  $SO_3^{2+}$  en el caso de tales autores y 7,0% en el del presente trabajo ó probetas de mortero ASTM C 452 de 1x1x6 cm -. De donde se puede deducir por tanto con fundamento que TODOS los Cementos de Mezcla PA y PUZ de este trabajo, preparados con la puzolana M<sup>3</sup> - que como se recordará cumplieron satisfactoria y sobradamente el ensayo de Fratini, véase Fig. 4, a la edad de 7 días -, pueden ser considerados a un mismo tiempo:

- 1º.- Según los trabajos de tales autores y los valores de consecución de los parámetros antes citados, como Cementos EXPANSIVOS - lógicamente de tipo M o M-S (según sea PY ó P de contenido elevado de  $C_3A$ , su cemento portland matriz constitutivo respectivo), preferentemente -, o al menos DE ELEVADAS o ALTAS RESISTENCIAS MECANICAS INICIALES, ARI (1), según los casos, pudiendo estar PRESCRITOS por tanto para tal fin, y justificándose de este modo los rápidos y elevados valores de RMF y RMC y parámetros derivados correspondientes, en especial  $Vc\Delta$ RMF y  $Vc\Delta$ RMC, alcanzados en este trabajo en todos los casos por sus probetas respectivas.

2<sup>a</sup>.- Según los valores de  $\Delta\phi(\%)$  e  $\Delta\bar{L}(\%)$  de sus tortas y probetas respectivas correspondientes a los métodos de ensayo L-A e H-1 preferentemente, como DE NO ELEVADA RESISTENCIA AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO, estando PROSCRITOS por tanto para tal fin; ello no implicará obligatoriamente que todos los existentes en el mercado preparados con tal tipo de puzolana alumina M o similar también tengan que ser considerados como de no elevada RS, por lo que necesariamente y antes de su utilización en obra se le(s) habrá de determinar su grado de RS respectivo mediante un método acelerado de ensayo adecuado para tal fin como muy bien puede ser alguno(s) de los empleados en este trabajo, véase Aplicaciones XII.

Tabla 24

		Cemento Portland Matriz :										
		Puzolana	P-1 a/c	P-2 a/c	P-4 a/c	P-32 a/c	P-31 a/c	P-5 a/c	PY-5 a/c	PY-1 a/c	PY-4 a/c	PY-5 a/c
Cementos de Mezcla P ó PY/D ó N :	80/20	D	0,680	0,675	0,690	0,670	0,710	0,750	0,670	0,675	0,710	0,750
		N	0,680	0,675	0,690	0,670	0,615	0,605	0,565	0,575	0,650	0,670
	70/30	D	0,750	0,310	0,310	0,770	0,840	0,860	0,750	0,790	0,750	0,770
		N	0,740	0,300	0,800	0,740	0,830	0,835	0,745	0,780	0,725	0,750
	50/40	D	0,840	0,900	0,885	0,940	0,990	0,960	0,850	0,850	0,940	0,850
		N	0,835	0,885	0,860	0,915	0,980	0,950	0,830	0,830	0,935	0,845

\* NOTA

Comprendido entre, el P-4 (10,71%  $C_3A$ ) y el P-32 (9,30%  $C_3A$ ) del presente trabajo.

2\* NOTA

6,975%  $SO_3$  = 15,0% yeso; 7,0%  $SO_3$  = 15,05% yeso

3\* NOTA

Y Cemento Portland P ó PY, única y exclusivamente.

VIII.2.2.2.4.- Cementos de mezcla preparados con las Puzolanas Industriales, O, A y C.

Discusión VIII.2.2.2.4

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$ , véase Tablas 55, 56 y 26.

1ª.- Caso del empleo de la Puzolana O:

1ª.1ª.- Sea cual fuere el cemento de mezcla PA ó PUZ de que se trate, la evolución de los valores del  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respectivas, es de aumento gradativo conforme transcurre el tiempo, pero siendo el mismo algo mayor a las edades iniciales que intermedias y finales del mismo, y distinto de un cemento de mezcla a otro, aún dentro de una misma familia, diferenciándose de la de su cemento portland matriz respectivo solo en su cuantía, la cual no sufre en caso alguno ascensos rápidos y notables, véase discusión VIII.2.2.1, 1ª.

Y en cuanto al parámetro derivado  $V_{cl}$  se puede decir otro tanto a lo dicho en el caso de las puzolanas D y N.

1ª.2ª.- Se puede decir que, en general, la relación entre los valores de  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$  originados, y la cantidad de puzolana O añadida en cada caso, es diferente, según sea el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante correspondiente de cada familia de cementos de mezcla PA y PUZ, de tal modo y manera que si el mismo es de contenido elevado, caso del P-1 y P-2, el  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$  disminuye en ambas familias con la cantidad de puzolana O añadida, y viceversa en caso contrario, en cuyo caso además, a igualdad de edad y cemento de mezcla, el valor del  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$  alcanzados, ha disminuido con el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz, P-31 y PY-4 ó PY por este orden.

En cualquier caso tales valores logran superar por lo general, a los correspondientes a su cemento portland matriz respectivo sólo, en tantas mas edades y número de casos, cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del mismo y viceversa.

En definitiva y según ello, ocurre :

a)

$\bar{\Delta}L$ Vcl	P-1; 100/00		p.f.e.
		P-1 ó P-2/0; 80/20 > 70/30 > 60/40	p.f.e.
	P-2; 100/00		de 21 a 28 d. el > pasa a <

por lo tanto se puede decir con fundamento que en estos casos impera el efecto químico inverso de la sustitución física ó "efecto de un inerte<sub>RS</sub> aparente" ó "efecto de una puzolana silícica muy pura" ; sin embargo para el caso de los cementos de mezcla de cemento portland matriz de contenido prácticamente nulo de  $C_3A$ , ocurre todo lo contrario, es decir

b)

$\bar{\Delta}L$ < Vcl <	PY-4 ó PY-6/0; 100/00 < 80/20 < 70/30 < 60/40	p.f.e. excepto 7 días PY-4/0 80/20
----------------------------	---	--

por lo tanto en estos otros casos así como también en el siguiente, se puede decir con fundamento que impera el efecto químico directo de la sustitución física o "efecto de una puzolana aluminica".

c)

$\bar{\Delta}L$ < Vcl <	P-31/0;	80/20 < 70/30 < 60/40 < 100/00 < ó < 100/00 <	de 7 a 60 días
		80/20 < 70/30 < 60/40 < 100/00	de 90 a 730 días

siendo los valores de  $\bar{\Delta}L$  y Vcl de las probetas del cemento portland matriz P-31 solo, hasta la edad de 90 días, mayores cuanto menor ha sido la adición de puzolana, caso del P-31/0 80/20, y viceversa, en el caso del P-31/0 60/40, quedando los valores de las probetas de cemento de mezcla hermano P-31/0 70/30, en posiciones intermedias entre ambas anteriores, según la edad del ensayo.

## 2º.- Caso de las Puzolana A:

2º.1º.- Vale aquí lo expuesto anteriormente en la Discusión 1º.1º de la puzolana O.

2º.2º.- Se puede decir que, en general, la relación entre los valores de  $\bar{\Delta}L$  y Vcl originados, y la cantidad de puzolana A añadida en cada caso, es diferente, según sea el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz

acompañante correspondiente de cada familia de cementos de mezcla PA y PUZ, y según la edad del ensayo que se considere; de modo y manera que, si el mismo es de contenido elevado, caso del P-1 y P-2, el  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  disminuye en ambas familias con la cantidad de puzolana añadida, excepto a la edad de 7 días, que ocurre lo contrario, es decir ocurre lo que en el resto de las familias de cementos ensayadas, cuyo cemento matriz acompañante ha sido de mediano, caso del P-31, ó nulo, teóricamente, contenido de  $C_3A$ , caso del PY-4 y PY-6 siendo en este último caso, y a igualdad de cemento de mezcla, tanto menor el aumento cuanto menor ha sido el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante, caso del PY-4 y PY-6.

A continuación, vale aquí lo expuesto anteriormente en igual situación de la discusión 1ª.1ª de la puzolana 0.

En definitiva y según ello, ocurre :

a)

$\bar{\Delta L}$	P-1 ó P-2/A; 100/00 < 80/20 < 70/30 < 60/40	de 7 a 21 días
$V_{cl}$	P-1/A ; 100/00 > 80/20 > 70/30 > 60/40	a 28 días
	P-2/A ; 80/20 > 70/30 > 60/40 > 100/00	a 28 días
	P-1 ó P-2/A; 100/00 > 80/20 > 70/30 > 60/40	de 28 a 730 días

por lo tanto se puede decir con fundamento que impera el efecto químico inverso de la sustitución física ó "efecto de un inerte aparente", ó "efecto de una puzolana silícica muy pura", excepto a la edad de 7 días en que el efecto es el opuesto, es decir, como en el caso siguiente de las familias de cementos de mezcla de cemento matriz acompañante PY-4 y PY-6, respectivamente,

b)

$\bar{\Delta L}$ < $V_{cl}$ <	PY-4 ó PY-6/A; 100/00 < 80/20 < 70/30 < 60/40	p.f.e.
----------------------------------	---	--------

donde se puede decir con fundamento que impera el efecto químico directo de la sustitución física ó "efecto de una puzolana aluminica", y por último,



c) ocurre otro tanto que en la puzolana O.

3º.- Caso del empleo de la puzolana C :

3º.1º.- Se puede decir que, en general, sea cual fuere la familia de cementos de mezcla PA y PUZ de que se trate a igualdad de edad se cumple que, los valores de  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$  de sus probetas respectivas aumenta con la cantidad de puzolana C añadida, siendo los valores absolutos alcanzados, a igualdad de cemento de mezcla, tanto menores cuanto menor ha sido el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz respectivo, y manteniéndose en cualquier caso la mayoría sobre el correspondiente a su cemento portland matriz solo, tanto mas tiempo cuanto menor ha sido el citado contenido, es decir

$\bar{\Delta}L$ $Vcl$	P-1 <	P-nº ó PY-nº/C; 80/20 < 70/30 < 60/40	hasta 7 días
	P-1 >		de 14 a 730 días
	P-2 <		hasta 21 días
	P-2 >		de 28 a 730 días
	P-31 <		h.7 d. (d.7 a 50 d.)
	P-31 >		de 60 a 730 días
	PY-4 ó PY-6 <		p.f.e.

Por lo tanto se puede decir con fundamento que impera el efecto químico directo de la sustitución física ó "efecto de una puzolana aluminica".

4º.- Estudio comparativo de las tres puzolanas :

4º.1º.- La clasificación que se obtiene a igualdad de cemento de mezcla de las tres puzolanas ensayadas O, A y C en función del valor del  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respectivas, de menor a mayor por este orden, depende tanto del cemento matriz P ó PY que las acompañe en cada caso, como de la edad del ensayo a la que se realice la misma, véase Tabla 71 , donde se puede observar como la clasificación O A C, se repite a TODAS las edades reseñadas, es decir tanto a la edad de 28 días como a la de 730 días o final del ensayo, en el caso de que el cemento portland

matriz acompañante sea el PY-4 ó PY-6, o sea de contenido prácticamente nulo de  $C_3A$ .

5ª.- En el caso del empleo de estas puzolanas O, A ó C, la relación  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$  osciló siempre entre 0,475 y 0,60.

6ª.- Véase la discusión VIII.2.2.2.5 (E) 3ª, venidera.

Discusión VIII.2.2.2.4 (cont.)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta RMF$ ,  $\Delta RMC$ ,  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$ , véase Tablas 57, 58, 59, 60, 61, 62, 28 y 29.

1ª.- Sea cual fuere el cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con cada una de estas puzolanas O, A y C, la evolución de los valores,

- absolutos de los parámetros RMF y RMC,
- relativos ó incrementos porcentuales correspondientes,  $\Delta RMF$  y  $\Delta RMC$ , y
- dé las velocidades de crecimiento de los mismos,  $Vc\Delta RMC$  y  $Vc\Delta RMC$  de sus probetas respectivas a lo largo de todo el ensayo, ha sido,
- caso de los primeros y segundos, de aumento generalizado y más o menos sinuoso hasta alcanzar un valor máximo,
  - . bien a la edad final del ensayo, ó
  - . bien a una edad intermedia del mismo, en cuyo caso se suele producir un descenso ó ascenso, según cada caso, suave, pero también más o menos sinuoso, hasta la edad final del mismo;
- y todo ello al igual que ocurriere aproximadamente con sus cementos portland matrices P ó PY solos, respectivos, aunque habiendo más similitud con los mismos por parte de cada uno de los cementos de mezcla de las puzolanas O y A, que de la C, y
- caso de los terceros, de disminución o aumento seguido de disminución, ambos relativamente rápidos, mas aún en el caso de la C que en el caso de la O y A, y que suelen aminorarse notoriamente hasta su práctica nulidad a partir de las edades de 90 ó 120 días, siendo, no obstante, la edad de 7 ó 14 ó 21 días (pero siempre antes de la de 28 días), la de mayor valor absoluto de todas, y más aún en el caso de la puzolana C (siempre a los 7 días), que en el de la O y A, las cuales lo alternan dicho valor máximo, o bien a 7, ó a 14 ó a 21 días, según el cemento de mezcla y el parámetro derivado,  $Vc\Delta RMF$  ó  $Vc\Delta RMC$ , de que se trate.

No obstante lo verdaderamente interesante de todo ello es que el mayor valor absoluto y relativo respecto del total de los parámetros  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$  se originan en los primeros 28 días del ensayo.

2ª.- Sea cual fuere la familia de cementos de mezcla PA y PUZ preparada con cada una de estas puzolanas O, A y C, y así ensayada, los valores de la RMF y RMC de sus probetas respectivas,

† a la edad de 1 día, disminuye,

- en valor absoluto, o sea, a igualdad de edad y de familia de cementos de mezcla PA y PUZ, con la cantidad de puzolana correspondiente añadida y viceversa, en cuyo caso más extremo posible ó presencia en exclusiva del cemento portland matriz acompañante respectivo solo, se alcanza el mayor valor de todos ellos, y

- en valor relativo, o sea, a igualdad de edad y de cemento de mezcla PA y PUZ, con el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz acompañante respectivo, aunque con las tres puzolanas de una forma un tanto aproximada nada más, por las excepciones notables,

- . de ser los menores valores de todos, en el caso de los del P-2, y

- . de ser los mayores valores de todos, en el caso de los de P-31, respectivamente, cumpliéndose todo ello algo más apreciablemente en los cementos de mezcla 80/20 que en los hermanos correspondientes 60/40, en los que no se mantiene en absoluto ni la generalidad citada, ni alguna otra.

† a la edad de 7 días, y

- en valor absoluto, o sea, a igualdad de edad y de familia de cementos de mezcla PA y PUZ, los valores de los parámetros,

- . RMF y RMC, disminuyen por lo general, caso de las puzolanas O y A únicamente, pues con la C ocurre admirablemente TODO LO CONTRARIO, mientras que los de

- .  $\Delta RMF$ ,  $\Delta RMC$ ,  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$ , aumentan por lo general en todos los casos,

con la adición de puzolana, y viceversa, en cuyo caso más extremo posible ó presencia en exclusiva del cemento portland matriz acompañante respectivo solo, se alcanza el mayor valor de todos ellos, y

- en valor relativo, o sea, a igualdad de edad y de cemento de mezcla PA ó PUZ, aumentan con ligera generalidad, con el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz acompañante respectivo solo, aunque de nuevo esta generalidad se cumple como decimos un tanto aproximada con las tres puzolanas, por idénticas excepciones de los del P-2 y P-31 del caso anterior, y además en este caso de los del PY-4; aunque con la notable diferencia en el presente de que si la generalidad en cuestión se cumple también bastante más en los 80/20 que en los 60/40, en éstos, y para el caso de la puzolana C, bien pudiera decirse que ocurre la contraria, es decir, con la disminución en el contenido de  $C_3A$  de aquél solo, hasta el punto que y como se verá a las edades finales del ensayo no se observa diferencia notable alguna entre las de las tres puzolanas, sea el que fuese el cemento de mezcla comparado que se considere.

+ al resto de las edades de ensayo,

- si son iniciales se parece bastante a lo dicho en la de 7 días,
- si son intermedias o finales, se parece bastante a lo dicho en la de 1 día.

Por lo tanto y en definitiva lo realmente destacable de toda esta discusión es que por lo general a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ y cemento portland matriz conformante correspondiente P ó PY, se cumple que a las edades iniciales del ensayo, desde la de 7 hasta la de 90 ó 120 días, los valores de los parámetros RMF y RMC y derivados correspondientes de las probetas preparadas con la puzolana C son bastante superiores a los correspondientes de las puzolanas O y A, aminorándose tal diferencia conforme transcurre el ensayo, hasta el punto que, en la mayoría de los casos, excepto los del cemento portland matriz acompañante P-31, los de aquella acaban siendo superados por los de éstas, en especial la O, a la edad final del mismo. Esta generalidad se mantiene, de forma algo aproximada respecto a los valores de las RMF y RMC correspondientes a las probetas del cemento portland matriz acompañante respectivo solo, de modo y manera que en cierta medida durante,

- las edades iniciales del ensayo, los de los 80/20 de la puzolana C suelen ser superiores al de aquél solo, mientras que a

- las edades finales del mismo, iguales o inferiores, ocurriéndoles a las puzolanas O y A todo lo contrario.

Por último y en cuanto a las clasificaciones que se obtendrían de las puzolanas O, A y C así ensayadas a las edades fundamentales del ensayo de 7 y/o 14 y/o 28 y/o 730 días, en función de los valores de los parámetros RMF y RMC respectivamente de menor a mayor valor por este orden, véase la Tabla 72.

#### Discusión VIII.2.2.2.4 (cont.)

(G) Parámetro : Porosidad, véase Tablas 63, 64 y 28.

1ª.- Sea cual fuese el cemento de mezcla PA y/o PUZ preparado con cada una de las puzolanas O, A y C, y así ensayado, la evolución de los valores de este parámetro porosidad de sus probetas respectivas, varía a lo largo del ensayo con sinuosidad irregular no semejante de uno a otro cemento de mezcla (aunque con una relativa mayor afinidad entre los tres miembros de una misma familia 80/20, 70/30 y 60/40), y de periodo constantemente variable durante el mismo, resultando que en todos ellos se alcanza un valor máximo mayor y mínimo menor, cuya edad de consecución varía de uno a otro cemento de mezcla aún dentro de los miembros de una misma familia.

Y todo ello al igual que ocurriese en la forma que no en la cuantía, con su cemento portland matriz acompañante respectivo solo.

2ª.- Se puede decir que sea cual fuese la familia de cementos de mezcla PA y PUZ preparada con cada uno de ellos y así ensayada a igualdad de edad y cemento de mezcla se cumple que el valor de la porosidad de sus probetas respectivas es por lo general, ligeramente mayor que el correspondiente a las probetas de su cemento portland matriz respectivo P ó PY solo, aumentando tal diferencia:

a) en valor absoluto, es decir, a igualdad de familia de cementos de mezcla, conforme aumenta la adición de puzolana a aquél, es decir

Porosidad (%)	P-1, P-2, P-31, PY-4, ó PY-6/O, A ó C 60/40 - P-1, P-2, P-31, PY-4 ó PY-6 >	p.f.e
	> P-1, P-2, P-31, PY-4 ó PY-6/O, A ó C 70/30 - P-1, P-2, P-31, PY-4 ó PY-6 >	
	> P-1, P-2, P-31, PY-4 ó PY-6/O, A ó C 80/20 - P-1, P-2, P-31, PY-4 ó PY-6, -	
	P-1, P-2, P-31, PY-4 ó PY-6/O, A ó C ; 60/40 > 70/30 > 80/20	

b) en valor relativo, es decir, a igualdad de edad solo inicial hasta 28 días y de cemento de mezcla PA y PUZ, conforme disminuye el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz P ó PY solo, es decir,

> Poros (%)	PY-6/O, A ó C 80/20 ó 70/30 ó 60/40 - PY-6 ≈ PY-4/O, A ó C 80/20 ó 70/30
	ó 60/40 - PY-4 > P-31/O, A ó C 80/20 ó 70/30 ó 60/40 - P-31 > P-2/O, A ó C
	80/20 ó 70/30 ó 60/40 - P-2 > P-1/O, A ó C 80/20 ó 70/30 ó 60/40 - P-1,
	-----
	P-n <sup>o</sup> /O, A ó C 80/20 ó 70/30 ó 60/40 > PY-n <sup>o</sup> /O, A ó C 80/20 ó 70/30 ó 60/40

#### Discusión VIII.2.2.2.4 (cont.)

(H) Parámetros :  $V_u$ ,  $\Delta V_u$  y  $V_c \Delta v_u$ , véase Tablas 63, 64, 65, 66, 67 y 30.

1ª.- Se puede decir que sea cual fuese el cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con cada una de ellas, y así ensayado, la creación, evolución y desarrollo de los valores de estos parámetros  $V_u$ ,  $V_u$  y  $V_c V_u$  de sus probetas respectivas, varía a lo largo del ensayo, de modo y manera que,

- los dos primeros, aumentan por lo general, progresivamente a lo largo del mismo, con una ligera disminución, o no, según el carácter más o menos aluminico de la puzolana, a la edad final de aquél, y
- el tercero disminuye, progresivamente hasta su práctica nulidad, siendo no obstante lo realmente interesante de él, que el valor absoluto y relativo del mismo, transcurren generalmente durante los primeros 28 días del ensayo.

Y todo ello al igual que ocurriere en el fondo que no en la forma, con su cemento portland matriz acompañante común respectivo solo.

2ª.- Se puede decir que sea como fuere la familia de cementos de mezcla PA y PUZ preparada con cada una de ellas y así ensayada, los valores de la  $V_u$  y parámetros derivados, de sus probetas respectivas disminuye con la adición de puzolana, es decir

> $V_u$	P-n <sup>o</sup> ó PY-n <sup>o</sup> /O, A, C ó M ; 80/20 > 70/30 > 60/40	p.f.e.
---------	---	--------

siendo mayor o menor que los correspondientes a su cemento portland matriz acompañante común respectivo P ó PY solo, según la edad, el cemento de mezcla y la puzolana más o menos aluminica que se considere.

3\*.- Por lo general, a igualdad de edad,

- inicial, hasta la de 28 días,
- intermedia y/o final, desde la de 60 a la de 730 días

del ensayo, y cemento de mezcla PA ó PUZ, las clasificaciones que se obtendrían de las puzolanas O, A, C y M comparadas y así ensayadas, en función de los valores de Vu de sus probetas respectivas, de menor a mayor valor por este orden, serían las siguientes, véase Tabla 67.

Tabla 67

Clasificación de las Puzolanas A, O, C y M entre sí y respecto a su cemento portland matriz constituyente respectivo, P ó PY (*) en f(Vu) de menor a mayor valor							
Edad (días)	Parámetro		P-1	P-2	P-31	PY-4	PY-6
7	Vu	80/20	A < C* < O < M	*A < C < O < M	A < O* < C < M	A* < O = M < C	A* < O < C < M
7		70/30	O < A* < C < M	*A < O < C < M	A < O < C* < M	A < O* < M < C	A < O < C < M
7		60/40	O* < C < A < M	A* < O < C < M	O < A < C* < M	A < O < C* < M	A < O < C < M*
14		80/20	*A < O < C < M	A < O* < C < M	A < O* < C < M	A* < O < M < C	A < O < C < M
14		70/30	A < O < C < M	A < O < C* < M	O < A < C < M	A < O* < M < C	A < O < C* < M
14		60/40	O < A* < C < M	A < O < C* < M	O < A < C* < M	A < O < C* < M	A < O < C < M*
28		80/20	*A < O < C < M	A* < C < O < M	A < O* < C < M	A* < O < C < M	A < O < C* < M
28		70/30	*A < O < C < M	A* < O < C < M	A < O* < C < M	A < O* < C < M	A < O < C* < M
28		60/40	O* < A < C < M	A < O* < C < M	O < A < C* < M	A < O < C < M*	A < O < C < M*
730	80/20	*A < O < C < M	C* < M < A < O	A < C < O* < M	A* < O < M < C	A* < O < C < M	
730	70/30	*A < O < C < M	O* < M < A < O	A < C < M < O*	A < M* < C < O	A < M* < C < O	
730	60/40	C < A = M* < O	C < A < M* < O	C < A < M < O*	A < M < C* < O	A < M < C* < O	

donde las líneas unión de asteriscos indican que a más puzolana añadida menos Vu (y más porosidad, como así ocurre en este trabajo).

Lo cual viene a confirmar que dentro de lo escaso este parámetro tiene algo más de sensibilidad, poder de discriminación, resolución y ordenamiento para calificar y clasificar a las puzolanas a través del mismo.

Discusión VIII.2.2.2.4 (cont.)

(I) Parámetros:  $SO_4^{=}$  lcp y Vv, véase Tablas 68, 69 y 30.

1ª.- Sea cual fuere el cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con cada una de estas puzolanas O, A y C, respectivamente y así ensayado, la creación, evolución y desarrollo de los valores de los parámetros  $SO_4^{=}$  lcp y Vv de sus probetas respectivas, es de disminución constante y progresiva hasta la edad final del ensayo, siendo la misma mucho mas notable durante las primeras edades del ensayo que durante el resto de las mismas, y mas concretamente de la edad de 7 a 14 días para el caso de la puzolana C (que en un cierto sentido hacer recordar algo en la forma a la M), seguido de la A y O por este orden, hasta llegar prácticamente a la nulidad del mismo. Y todo ello,

- al igual que ocurriere cualitativamente con su cemento portland matriz acompañante correspondiente, si el mismo es de mediano a elevado contenido de  $C_3A$ , caso del P-1, P-2 y P-31, respectivamente, y
- a diferencia de lo que ocurriere cuali y cuantitativamente con su cemento portland matriz acompañante, si el mismo es de contenido prácticamente nulo de  $C_3A$ , caso del PY-4 y el PY-6, respectivamente.

No obstante y pese a todo lo cual, lo verdaderamente interesante es que tanto el mayor valor absoluto como el relativo (respecto del total) del parámetro Vv se verifica en todos los casos durante los primeros 28 días de edad del ensayo, y dentro de los mismos, por lo general, mas pronto en el caso de la puzolana C, seguida de la A y O, respectivamente, por este orden, y tanto mas pronto cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante común y viceversa.

2ª.- Sea cual fuese la familia de cementos de mezcla PA y PUZ preparados con cada una de estas puzolanas, O, A y C, y así ensayada, la cantidad de  $SO_4^{=}$  lcp y de la Vv de sus probetas respectivas disminuyen,

- en valor absoluto, o sea, a igualdad de edad y familia de cementos de mezcla PA y PUZ, con la adición de puzolana, y viceversa, en cuyo caso mas extremo posible ó presencia en exclusiva del cemento portland matriz respectivo solo, se produce el mayor valor de todos ellos,



- en valor relativo, o sea, a igualdad de edad y cemento de mezcla PA ó PUZ, con el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz respectivo solo, y viceversa, en cuyo caso opuesto o práctica nulidad del mismo, caso de que el cemento portland matriz acompañante ha sido el PY-4 y el PY-6, paradójicamente no se ha producido, a igualdad de edad, puzolana y cemento de mezcla, la igualdad exacta, y si solo en el orden de magnitud, en las cantidades de  $SO_3$  de los mismos.

3ª.- A igualdad de edad (excepto la de 7 días en el caso de las puzolanas O y A) y cemento portland matriz acompañante respectivo P ó PY, se cumple que

$> SO_{41cp}^= >$	$P-n^{\circ} \text{ ó } PY-n^{\circ}/O \ 80/20 \text{ ó } 70/30 \text{ ó } 60/40 >$ $> P-n^{\circ} \text{ ó } PY-n^{\circ}/A \ 80/20 \text{ ó } 70/30 \text{ ó } 60/40 >$ $> P-n^{\circ} \text{ ó } PY-n^{\circ}/C \ 80/20 \text{ ó } 70/30 \text{ ó } 60/40$	de 7 a 730 días *
-------------------	---	-------------------

4ª.- Idem a igualdad de puzolana O, A ó C, se cumple

$< SO_{41cp}^= <$	$P-n^{\circ}/O, A \text{ ó } C \ 80/20 \text{ ó } 70/30 \text{ ó } 60/40 <$ $< PY-n^{\circ}/O, A \text{ ó } C \ 80/20 \text{ ó } 70/30 \text{ ó } 60/40$	de 7 a 730 días *
-------------------	---	-------------------

Interpretación VIII.2.2.2.4(E)(F)(G)(H)(I)

Véase la interpretación VIII.2.2.2.6, (c).1, venidera.

---

\* La puzolana C de p.f.e., o sea de principio a fin del ensayo.

VIII.2.2.2.5.- Cementos de mezcla preparados con las Puzolanas Industriales CV-10 y CV-19 :

Antes de pasar a realizar el estudio, discusión e interpretación de los valores obtenidos con estas puzolanas CV-10 y CV-19, se desea hacer constar que los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con las mismas, no proliferaron tanto como con las puzolanas ya estudiadas D, N, O, A, C y M, respectivamente, puesto que en el presente caso y a raíz de las conclusiones obtenidas de aquellas, primó más el interés por el estudio relativo de tales puzolanas CV-10 y CV-19 (dada la composición química de dichas puzolanas y de un modo especial los contenidos de los compuestos a base de hierro y aluminio), respecto al cemento portland matriz acompañante común P-31 sólo, que entre ellas mismas únicamente.

Discusión VIII.2.2.2.5

(E) Parámetros :  $\bar{A}L$  y  $Vcl$ , véase Tabla 41, 70 y 26.

1ª.- (a) Comparación de ambas puzolanas por separado con el cemento portland P-31 matriz que las acompaña, véanse Tablas 41 y 26:

1ª.- A las primeras edades del ensayo (hasta los 14 ó 21 días) los cementos PUZ preparados con ambas puzolanas y así ensayados originan unos  $\bar{A}L$  mayores que los correspondientes al cemento portland P-31 matriz que las acompaña.

2ª.- A la edad de 28 días, el cemento PUZ preparado con la puzolana CV-10 origina mayores  $\bar{A}L$  que el cemento P-31 matriz que la acompaña. Por el contrario el correspondiente a la puzolana CV-19 origina todo lo contrario. En definitiva en el primer PUZ impera el efecto químico directo de la sustitución física y en el segundo PUZ, el efecto químico inverso.

3ª.- A partir de dicha edad de 28 días, los  $\bar{A}L$  producidos por tales cementos PUZ preparados con las puzolanas CV-10 y CV-19 respectivamente originan unos  $\bar{A}L$  menores que los del cemento P-31 matriz que las acompaña.

(b) Comparación de ambas puzolanas entre sí, véanse Tablas 41 y 70 :

1ª.- A las primeras edades (hasta 28 días) el cemento de mezcla PUZ preparado con la puzolana CV-10 y así ensayado, origina mayores  $\bar{A}L$  que su homónimo preparado con

la puzolana CV-19, es decir es proporcional a su contenido de  $Al_2O_3$  respectivo.

2\*.- A partir de dicha edad ocurre todo lo contrario, es decir, no es proporcional a su MF respectivo.

2\*.- En el caso del empleo de estas puzolanas CV-10 y CV-19, la relación  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$  fué de 0,62 y 0,55 respectivamente.

3\*.- De los 49 cementos de mezcla PA y/o PUZ preparados con las puzolanas O, A, C, CV-10 y CV-19, respectivamente, y así ensayados, - 13 (26,53%), han resultado ser de elevada RS, puesto que el  $\Delta L_{28d} \leq 0,054\%$ , según la Tabla 31 y la parte final de la interpretación VIII.2.2.1,

- 4 (8,16%), han resultado ser de moderada RS, puesto que  $0,054\% \leq \Delta L_{28d} \leq 0,073\%$ , según las referencias anteriores, y - 32 (65,31%), han resultado ser de baja o escasa RS, puesto que el  $\Delta L_{28d} \geq 0,073\%$ .

4\*.- A igualdad de puzolana y edad del ensayo el valor del  $\Delta L$  de las probetas amasadas con la relación  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.} = 0,62$  para la CV-10 y 0,55 para la CV-19, respectivamente, ha sido,

- superior, en el caso de la primera, la CV-10, e

- inferior, en el caso de la segunda, la CV-19,

que el correspondiente a las probetas homónimas amasadas con la relación  $\frac{a}{c} = c = 0,485$ .

#### Discusión VIII.2.2.2.5 (cont.)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta RMF$ ,  $\Delta RMC$ ,  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$  véanse Tablas - 42, 43, 44 y 70.

1\*.- Sea cual fuese el cemento de mezcla PUZ 70/30 de que se trate la creación, evolución y desarrollo de los valores de los parámetros.

- RMF, RMC,  $\Delta RMF$  e  $\Delta RMC$ , es de aumento constante y progresivo desde principio a fin del ensayo, aunque con diferencias notables entre ambos.

-  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$  es de disminución constante y progresiva hasta su práctica nulidad, aunque con diferencias notables entre ambos casos entre las edades de 7 y 14 días, pero que no impiden que la mayor parte de los mismos se produzcan durante los primeros 28 días de ensayo.

Y todo ello al igual que ocurriere con su cemento portland matriz P-31 sólo con la pequeña diferencia en las dos primeras parejas de parámetros que en este caso a las edades finales del ensayo se produce una ligera disminución.

2\*.- A igualdad de edad fundamental del ensayo, las clasificaciones que se obtienen de las dos puzolanas CV-10 y CV-19 así ensayadas

y de su cemento portland matriz P-31 sólo, en función de los valores de cada uno de estos parámetros, de menor a mayor, o viceversa según convenga, han sido las siguientes, véase Tabla 70.

Discusión VIII.2.2.2.5 (cont.)

(G) Parámetro: Porosidad, véase Tablas 45 y 70.

1ª.- En cada uno de los cementos de mezcla P-31/CV-10 70/30 y P-31/CV-19 70/30 la creación, evolución y desarrollo de los valores de este parámetro porosidad de sus probetas respectivas es como sigue:

- caso del P-31/CV-10 70/30: adopta la forma prácticamente de una campana de Gauss invertida, y
- caso del P-31/CV-19 70/30: adopta la forma de una sinusoide más ó menos regular.

Y en ambos casos, al igual que ocurriese en el fondo, que no en la forma, a como ocurriese con su cemento portland matriz constituyente común P-31 solo.

2ª.- A igualdad de edad fundamental del ensayo, las clasificaciones que se obtienen de las dos puzolanas CV-10 y CV-19 así ensayadas y de su cemento portland matriz P-31 solo en función de los valores de este parámetro son las siguientes, de menor a mayor valor por este orden, véase Tabla 70.

Discusión VIII.2.2.2.5 (cont.)

(H) Parámetros: Vu, Vu y Vc Vu, véase Tablas 45, 46 y 70.

1ª.- En cada uno de los cementos de mezcla P-31/CV-10 70/30 y P-31/CV-19 70/30, la creación, evolución y desarrollo de los valores de estos parámetros es,

- caso de los dos primeros y segundo, de aumento gradativo suavemente, ó no, sinuoso hasta llegar a un valor máximo alcanzable, por lo general, a las edades finales del ensayo, y
- caso del tercero, de disminución hasta acabar con su práctica nulidad, alcanzándose los máximos valores absolutos y relativos del mismo durante los primeros 28 días del ensayo.

Y todo ello al igual que ocurriese con su cemento portland matriz constituyente común P-31 solo.

2ª.- A igualdad de edad fundamental del ensayo, las clasificaciones que se obtienen de las dos puzolanas CV-10 y CV-19 así ensayadas y de su cemento portland matriz P-31 solo, en función de los valores de este parámetro de menor a mayor valor por este orden, son las siguientes, véase Tabla 70.

Discusión VIII.2.2.2.5 (cont.)

(1) Parámetros:  $SO_4^{=}$  lcp y Vv, véase Tablas 47 y 70.

1ª.- La evolución de la cantidad de  $SO_4^{=}$  de los cementos P-31/CV-10 70/30, P-31/CV-19 70/30 y P-31 solo, es de disminución constante y progresiva desde la primera a la última edad de ensayo, radiando únicamente la diferencia en el rango de los valores de cada uno de ellos, así como en la evolución de los mismos sobre todo en las edades iniciales del ensayo, de modo y manera que la Vv es muy notable para el primero y menos notable para el último, pero en cualquier caso la mayor parte de los valores de este parámetro transcurren durante los primeros 23 días de ensayo y más aún en los cementos de mezcla que en el P-31 solo, y dentro de aquellos más aún en el de la puzolana CV-10 que en el de la puzolana CV-19.

2ª.- A igualdad de edad fundamental del ensayo, las clasificaciones que se obtienen de las puzolanas CV-10 y CV-19 así ensayadas y de su cemento portland matriz P-31 solo, en función de los valores de este parámetro de mayor a menor valor por este orden son las siguientes, véase Tabla 70.

Interpretación VIII.2.2.2.5. (E) (F) (G) (H) (I)

Véanse las interpretaciones VIII.2.2.2.7, (C).2. y VIII.3.3.2.1. ambas venideras.

Tabla 70

Edad (días)	Parámetros	Comparación de los cementos de mezcla P-31/CV-10 70/30 y P-31/CV-19 70/30 en función de distintos parámetros (*=P-31)	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CV-19 (45,47)	< CV-10 (49,29)
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CV-19 (16,12)	> CV-10 (4,22)
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CV-19 (1,87)	< CV-10 (7,02)
	Frattini (CaO a %/l)	CV-19 (2,50)	> CV-10 (6,85)
28	ΔL (%)	CV-19 (3,49)*	< *CV-10 (7,98)
730		*CV-19 (29,30)	> CV-10 (9,23)
1		*P-31/CV-10	= P-31/CV-19
1-180		P-31/CV-19	< P-31/CV-10*
365		P-31/CV-10	= P-31/CV-19
730	PAV	P-31/CV-10	< P-31/CV-19
14	ΔL (%)	*CV-19 (0,081)	< CV-10 (0,140)
28		*CV-19 (0,126)	< CV-10 (0,141)
730		CV-19 (0,167)	> CV-10 (0,152)*
1		CV-19 (29,02)	< CV-10 (31,33)*
7		CV-19 (36,18)	< CV-10 (43,17)*
14	RWF (Kp/cm <sup>2</sup> )	CV-19 (49,15)*	< *CV-10 (60,03)
28		*CV-19 (66,17)	< CV-10 (75,84)
730		CV-19 (115,97)	> CV-10 (107,12)*
1		CV-19 (99,19)	< CV-10 (108,16)*
7		CV-19 (158,16)	< CV-10 (190,12)*
14	RWC (Kp/cm <sup>2</sup> )	CV-19 (171,54)	< CV-10 (231,27)*
28		*CV-19 (337,15)	< CV-10 (346,03)
730		*CV-19 (537,85)	> CV-10 (522,17)
14		CV-19 (23,00)	> CV-10 (22,90)*
28		*CV-19 (21,72)	< CV-10 (22,54)
730	Poros (%)	*CV-19 (23,08)	< CV-10 (23,12)
14		CV-19 (3,56)*	< *CV-10 (4,00)
28		CV-19 (3,70)*	< *CV-10 (4,11)
730		CV-19 (4,19)	< CV-10 (4,27)*
14		*CV-19 (0,1819)	> CV-10 (0,1363)
28	SO <sub>4</sub> lcp (g. SO <sub>3</sub> /l)	*CV-19 (0,1679)	> CV-10 (0,0844)
730		*CV-19 (0,0253)	> CV-10 (0,0121)
14		*CV-19 (0,067)	< CV-10 (0,136)
28		*CV-19 (0,125)	< CV-10 (0,257)
730		CV-19 (1,093)	< CV-10 (2,103)*
1	ΔL (%)	*CV-19 (11,76)	> CV-10 (11,48)
7		CV-19 (21,16)	< CV-10 (23,09)*
14		CV-19 (24,42)*	< *CV-10 (32,42)
28		CV-19 (26,56)*	< *CV-10 (33,68)
730		CV-19* (23,15)	< CV-10 (33,03)
1	RWC	CV-19 (40,47)*	< *CV-10 (54,16)
7		CV-19 (71,15)*	< *CV-10 (97,18)
14		CV-19 (88,62)	< CV-10 (121,11)*
28		CV-19 (99,06)*	< *CV-10 (134,56)
730		CV-19* (Inmed.)	< CV-10 (36,20)
14	Poros	CV-19* (23,76)	< CV-10 (24,74)
28		CV-19* (25,92)	< CV-10 (27,20)
730		CV-19*-Inmedible	< CV-10 (30,84)
14		CV-19 (2,77)*	< *CV-10 (3,24)
28		CV-19 (2,90)	< CV-10 (3,46)*
730	SO <sub>4</sub> lcp	CV-19 (3,05)	< CV-10 (3,07)*
14		*CV-19 (1,0117)	> CV-10 (0,8924)
28		*CV-19 (0,9853)	> CV-10 (0,7272)
730		*CV-19 (0,3721)	> CV-10 (0,2933)

VIII.2.2.2.6. Estudio Analítico Comparativo de la pareja de puzolanas silíceas D y N, con la aluminica M, véase Tablas 26, 32, 38, 41, 45, 47, 48 y 52.

Discusión VIII.2.2.2.6.

- 1ª.- En este apartado se han de tener en cuenta conjuntamente, las Discusiones individuales respectivas habidas anteriores de tales puzolanas D, N y M y del mismo modo todos aquellos comentarios afines hechos al hilo del estudio individualizado realizado a cada una de ellas.
- 2ª.- Como se puede observar, la clasificación que se obtiene de las tres puzolanas así comparadas en función del  $\bar{A}L$  de sus probetas respectivas, de menor a mayor valor por este orden, es muy distinta dependiendo mucho,
  - de la edad del ensayo a la que se realice,
  - del contenido, elevado o no, de  $C_3A$  de cemento portland matriz que las acompañe, y
  - del cemento de mezcla de que se trate,de modo y manera que la misma suele ser tanto más del tipo  $D < N < M$ , relación  $\frac{a}{c} = "d" \text{ ó } "c"$ , cuanto
  - menor ha sido el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante, sin llegar a anularse, y viceversa,
  - menor ha sido la edad del ensayo de que se trate, 14 y/o 28 días, y viceversa, 365 y/o 730 días,  $M < N < D$  (contenido de  $C_3A$  elevado), ó  $N < M < D$  (contenido de  $C_3A$  mediano ó bajo), y
  - ¿menor ó mayor? ha sido la adición de puzolana, y viceversa.
- 3ª.- A la edad de 7 días se verifica que a igualdad de cemento de mezcla y agua de amasado, el orden de magnitud de la Vcl correspondiente a las puzolanas D y N, es bastante similar, aunque con mayoría de la N conforme disminuye el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante correspondiente.

No obstante y pese a ello, tales valores de la Vcl de ambos son a su vez, muchísimo menores que los correspondientes a la puzolana M.

Por el contrario y conforme transcurre el ensayo, la relación anterior acaba por invertirse totalmente.
- 4ª.- Respecto al parámetro porosidad se puede decir que los valores del mismo a igualdad de edad y cemento de mezcla  $PA$  ó  $PUZ$ , varían

apreciablemente de un cemento de mezcla a otro, según el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz constitutivo, para el caso de las puzolanas D y N, que no la M, en los que tal variación es potencialmente escasa respecto a la de aquéllos, y en especial la ocurrida desde la edad de 1 a 7 ó 28 días, según los casos.

5ª.- Respecto del resto de los parámetros RMF, RMC, Vu,  $SO_4^{2-}$  y derivados correspondientes se verá en la discusión VIII.2.2.2.7 (venidera).

#### Interpretación VIII.2.2.2.6

Antes de entrar de lleno en esta Interpretación, conviene tener en cuenta a propósito de las interpretaciones y conclusiones habidas en el ensayo de Fratini, y mas concretamente las correspondientes a la Agrupación F, donde como se recordará, se obtuvo, entre otras, la conclusión de que por lo general, a igualdad de edad de 7 días y cemento de mezcla, la actividad de la puzolana M resultó ser notablemente superior, en este caso, a la N y D, por este orden.

Pues bien, puesto que en el ensayo ASTM C 452-68 se ha obtenido, a igualdad de edad inicial, hasta la de 28 días inclusive, cemento de mezcla de cemento portland matriz acompañante P ó PY, que:

- a) la puzolana M origina mayores  $\bar{\Delta}L$  que la D y la N, ó la N y la D, según los casos, y que
- b) la relación existente, en la forma que no en su cuantía, entre la cantidad de puzolana añadida y tales  $\bar{\Delta}L$  respectivos originados, tanto a las edades iniciales como intermedias y finales del ensayo -estas últimas, si el cemento portland matriz acompañante es un P ó PY de contenido de  $C_3A$  próximo al 5,0%, pues en caso contrario continúan siendo como las iniciales- es la misma, en el caso de las puzolanas M y N, que no la D por ser opuesta a ambas, (sobre todo a la M), a las edades iniciales,

no es aventurado el sospechar que tal similitud entre aquellas M y N, en particular a las edades iniciales del ensayo, pueda ser debida a que su  $Al_2O_3^{F-}$  constitutiva es la misma, aunque en muy distinta cuantía en ambas, a favor naturalmente de la M, siendo aquí aplicable por tanto y con mas razón todo lo dicho a propósito al final de la discusión VIII.2.2.2.3 (E), 2ª.



Por otra parte el que las clasificaciones que se obtienen de las mismas en función del valor de  $\overline{AL}$  de sus probetas respectivas, no hayan sido una y si varias diferentes, según el condicionante que se considere, ha de ser atribuible,

- a la acción sinérgica, en su caso, derivada del contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  de cada una de ellas, el cual al parecer debe ser escaso, si escaso es dicho contenido, caso de las puzolanas D y N, que no la M,
- al efecto protector ó "anti-sulfato"
  - . verdadero, derivado de los geles  $CSH_{SiO_2}^{r-}$  de las puzolanas D ó N
  - . falso, derivado de la máxima fijación de  $SO_3$  del 7,0% inicial en todos los casos por el contenido notable de  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana M y la acción sinérgica anterior, en detrimento del  $C_3A$  de la fracción cemento portland matriz acompañante, véanse Tablas 40, 47 y 54 del contenido de  $SC_4^{*}$  lcp respectivas.
- a ambos efectos anteriores, ocurribles únicamente sólo con las puzolanas D ó N, pero no con la M, y
- a la relación  $\frac{\text{cantidad de ettringita TOTAL posible a formar}}{\text{cantidad de } CSH_{SiO_2}^{r-} \text{ formada posible}}$

Y como confirmación de todo ello y en especial de la "aparente maldad" de la puzolana referencial silícica D y la "aparente bondad" de la puzolana referencial aluminica M, cuando ambas se mezclan por separado con un mismo cemento portland de muy elevado contenido de  $C_3A$ , como es el P-1 (14,11% de  $C_3A$ ), debido a la falta de  $SO_3$  en este método de ensayo para poder mostrar en estos casos de elevada presencia de  $C_3A$  el auténtico comportamiento de cada puzolana ó sea su verdadero carácter, está el hecho de que al estudiar las mismas a través de los métodos de ensayo L-A, con 15,50% de  $SO_3$  e H-1 con 21,0% de  $SO_3$ , es decir con cantidad suficiente de  $SO_3$  para tal fin ha ocurrido todo lo contrario, es decir, aquéllas se han portado tal como son, véanse Tablas 17 y 26 y pag. 424, y no distorsionadas y engañosas como en el presente ASTM C 452-68. De todo lo cual se deduce la necesidad de que el nuevo método acelerado de ensayo deba de poseer cantidad de  $SO_3$  necesaria y suficiente para calificar y cualificar a cada puzolana con cualquier cemento portland, de forma directa y no de forma indirecta como el presente.

De aquí que, y según lo anterior y los resultados obtenidos en cada caso, a la hora de estudiar, caracterizar, cualificar y/o comparar, estos tipos de puzolanas mediante este método de ensayo ASTM

ó similar, sea aconsejable el utilizar tres tipos de cemento portland de distinto contenido de  $C_3A$ , a saber,

- uno de elevado contenido, de  $\approx 15,5\%$  de  $C_3A$ ,
  - otro de mediano a bajo contenido de  $C_3A$ , del 7,0% al 4,0% de  $C_3A$ , y
  - otro de nulo (teóricamente) contenido de  $C_3A$ ,
- o al menos uno solo de contenido de  $C_3A$  de alrededor del 3,0%, o menos,

Y respecto al parámetro derivado  $Vcl$ , lógicamente se comprende que los valores de los mismos en cada caso han de deberse a la  $Al_2O_3^{r-}$  de cada puzolana y mas concretamente a su cociente  $\frac{SiO_2^{r-}}{Al_2O_3^{r-}}$  respectivo, de modo y manera que la notable diferencia habida entre aquellos en favor del de la puzolana M, viene a confirmar una vez mas el notable mayor contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  que ha de tener ésta puzolana M sobre las otras dos N y D, por este orden.

10. Fotografia(s) correspondente(s) a esta  
Tubo: 1422

[illegible]

o tipo de prova: ensaio em ASTM C 492 - 68 e N-1  
o parâmetro(s) medido(s) ou usado(s): RRF = RUC/2a

20160901010/20703040001012/0 03/  
Topic: WACS

[illegible]

**«Tissu de proctore: 1x1x6 cm ASTM C 402-69**

**TABLA 59**

10. For any  $n \in \mathbb{N}$ ,  $\text{CUT}(A, B, n) \leq \text{CUT}(A, B, n+1)$ .

ID	P	A	CEMENTO P-1 / PUZOLANA A			CEMENTO P-1 / PUZOLANA B			CEMENTO P-1 / PUZOLANA C			CEMENTO P-1 / PUZOLANA D			CEMENTO P-2 / PUZOLANA A			CEMENTO P-2 / PUZOLANA B			CEMENTO P-2 / PUZOLANA C			CEMENTO P-2 / PUZOLANA D			
			80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	
7	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
8	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
9	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
10	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
11	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
12	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
13	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
14	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
15	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
16	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
17	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
18	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2	73.2
19	72.2	26.2	21.3	33.4	77.5	75.5	71.6	71.3	70.5	75.4	74.4	70.5	70.2	70.1	70.3	73.8	73.2	73.2									

el tipo de probeta: 1x1x6 cm ASTM C 452-6

TABLA 60

007 000 001 002 003 004 005 006 007 008 009 010 011 012 013 014 015 016 017 018 019 020 021 022 023 024 025 026 027 028 029 030 031 032 033 034 035 036 037 038 039 040 041 042 043 044 045 046 047 048 049 050 051 052 053 054 055 056 057 058 059 060 061 062 063 064 065 066 067 068 069 070 071 072 073 074 075 076 077 078 079 080 081 082 083 084 085 086 087 088 089 090 091 092 093 094 095 096 097 098 099 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017

ID#	PRF 41			PRF 42			PRF 43			PRF 44			PRF 45			PRF 46			PRF 47			PRF 48			PRF 49			PRF 50			PRF 51			PRF 52			PRF 53			PRF 54			PRF 55			PRF 56			PRF 57			PRF 58			PRF 59			PRF 60			PRF 61			PRF 62			PRF 63			PRF 64			PRF 65			PRF 66			PRF 67			PRF 68			PRF 69			PRF 70			PRF 71			PRF 72			PRF 73			PRF 74			PRF 75			PRF 76			PRF 77			PRF 78			PRF 79			PRF 80			PRF 81			PRF 82			PRF 83			PRF 84			PRF 85			PRF 86			PRF 87			PRF 88			PRF 89			PRF 90			PRF 91			PRF 92			PRF 93			PRF 94			PRF 95			PRF 96			PRF 97			PRF 98			PRF 99			PRF 100			PRF 101			PRF 102			PRF 103			PRF 104			PRF 105			PRF 106			PRF 107			PRF 108			PRF 109			PRF 110			PRF 111			PRF 112			PRF 113			PRF 114			PRF 115			PRF 116			PRF 117			PRF 118			PRF 119			PRF 120			PRF 121			PRF 122			PRF 123			PRF 124			PRF 125			PRF 126			PRF 127			PRF 128			PRF 129			PRF 130			PRF 131			PRF 132			PRF 133			PRF 134			PRF 135			PRF 136			PRF 137			PRF 138			PRF 139			PRF 140			PRF 141			PRF 142			PRF 143			PRF 144			PRF 145			PRF 146			PRF 147			PRF 148			PRF 149			PRF 150			PRF 151			PRF 152			PRF 153			PRF 154			PRF 155			PRF 156			PRF 157			PRF 158			PRF 159			PRF 160			PRF 161			PRF 162			PRF 163			PRF 164			PRF 165			PRF 166			PRF 167			PRF 168			PRF 169			PRF 170			PRF 171			PRF 172			PRF 173			PRF 174			PRF 175			PRF 176			PRF 177			PRF 178			PRF 179			PRF 180			PRF 181			PRF 182			PRF 183			PRF 184			PRF 185			PRF 186			PRF 187			PRF 188			PRF 189			PRF 190			PRF 191			PRF 192			PRF 193			PRF 194			PRF 195			PRF 196			PRF 197			PRF 198			PRF 199			PRF 200			PRF 201			PRF 202			PRF 203			PRF 204			PRF 205			PRF 206			PRF 207			PRF 208			PRF 209			PRF 210			PRF 211			PRF 212			PRF 213			PRF 214			PRF 215			PRF 216			PRF 217			PRF 218			PRF 219			PRF 220			PRF 221			PRF 222			PRF 223			PRF 224			PRF 225			PRF 226			PRF 227			PRF 228			PRF 229			PRF 230			PRF 231			PRF 232			PRF 233			PRF 234			PRF 235			PRF 236			PRF 237			PRF 238			PRF 239			PRF 240			PRF 241			PRF 242			PRF 243			PRF 244			PRF 245			PRF 246			PRF 247			PRF 248			PRF 249			PRF 250			PRF 251			PRF 252			PRF 253			PRF 254			PRF 255			PRF 256			PRF 257			PRF 258			PRF 259			PRF 260			PRF 261			PRF 262			PRF 263			PRF 264			PRF 265			PRF 266			PRF 267			PRF 268			PRF 269			PRF 270			PRF 271			PRF 272			PRF 273			PRF 274			PRF 275			PRF 276			PRF 277			PRF 278			PRF 279			PRF 280			PRF 281			PRF 282			PRF 283			PRF 284			PRF 285			PRF 286			PRF 287			PRF 288			PRF 289			PRF 290			PRF 291			PRF 292			PRF 293			PRF 294			PRF 295			PRF 296			PRF 297			PRF 298			PRF 299			PRF 300			PRF 301			PRF 302			PRF 303			PRF 304			PRF 305			PRF 306			PRF 307			PRF 308			PRF 309			PRF 310			PRF 311			PRF 312			PRF 313			PRF 314			PRF 315			PRF 316			PRF 317			PRF 318			PRF 319			PRF 320			PRF 321			PRF 322			PRF 323			PRF 324			PRF 325			PRF 326			PRF 327			PRF 328			PRF 329			PRF 330			PRF 331			PRF 332			PRF 333			PRF 334			PRF 335		
-----	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	--------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------	--	--

2. Fotografia(s) correspondente(s) a este  
Tubo : 4233

o Tipo de prueba: 12x6 cm ASTM C 452-68  
o Parámetro(s) medido(s) en la misma: VCAIRF,

Fotografias, correspondência(s) e etc.  
Total: 4813

Zona	CEMENTO PY-4/PUZOLANA O			CEMENTO PY-4/PUZOLANA A			CEMENTO PY-4/PUZOLANA C			CEMENTO 80/PUZOLANA 201			CEMENTO 80/PUZOLANA 202																
	90/20	70/30	60/40	90/20	70/30	60/40	90/20	70/30	60/40	(PY-4/O)	(PY-4/A)	(PY-4/C)	(PY-6/A)	(PY-6/C)	(PY-6/O)														
7	17.22	18.24	17.22	16.75	15.37	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
8	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
9	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
10	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
11	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
12	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
13	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
14	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
15	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
16	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
17	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
18	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
19	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
20	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
21	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
22	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
23	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
24	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
25	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
26	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
27	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
28	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
29	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
30	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
31	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
32	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
33	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
34	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
35	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
36	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
37	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
38	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
39	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
40	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
41	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
42	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
43	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
44	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
45	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
46	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14	14.34	13.80	15.21	16.57	20.59	20.52	26.42	27.38	26.39	27.21	17.49	19.49	12.61	25.28	15.24	16.71	12.31	14.98	17.21	27.40	25.45	25.58
47	17.27	17.53	17.53	16.51	15.29	17.48	16.14</																						

Estado do produto: 1x16 cm y 1"x1" e 1/4" ASTM C 452-68  
 e por metro: medido: 1 m e 1 m. Análisis: 90% y 100% (usq)

TABLE 63

• Fotografias correspondentes de  
7-10-52-31

Código	Pavimento				Base				Sub-base				Sub-base				Sub-base			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1040	CEMENTO P-1/PUZOLANA 0																			
1041	CEMENTO P-1/PUZOLANA 0																			
1	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
7	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
14	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
28	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
35	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
42	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
49	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
56	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
63	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
70	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
77	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
84	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
91	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
98	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
105	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
112	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
120	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
130	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
140	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
150	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
160	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
170	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
180	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
190	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
200	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
210	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
220	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
230	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
240	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
250	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
260	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
270	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
280	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
290	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
300	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
310	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
320	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
330	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
340	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
350	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
360	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
370	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
380	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
390	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
400	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
410	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
420	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
430	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
440	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
450	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
460	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
470	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
480	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
490	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
500	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
510	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
520	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
530	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
540	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
550	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
560	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
570	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21	2.21	3.21	1.21
580	3.21	1.21	2.21	3.21																

ТАБЛА 64

[illegible]

6. Fotografic(s)/correspondente(s) e endereço: \_\_\_\_\_

\*Tipo de prueba: 1° 2° 3° 4° 5° 6° 7° 8° 9° 10° 11° 12° 13° 14° 15° 16° 17° 18° 19° 20° 21° 22° 23° 24° 25° 26° 27° 28° 29° 30° 31° 32° 33° 34° 35° 36° 37° 38° 39° 40° 41° 42° 43° 44° 45° 46° 47° 48° 49° 50° 51° 52° 53° 54° 55° 56° 57° 58° 59° 60° 61° 62° 63° 64° 65° 66° 67° 68° 69° 70° 71° 72° 73° 74° 75° 76° 77° 78° 79° 80° 81° 82° 83° 84° 85° 86° 87° 88° 89° 90° 91° 92° 93° 94° 95° 96° 97° 98° 99° 100° 101° 102° 103° 104° 105° 106° 107° 108° 109° 110° 111° 112° 113° 114° 115° 116° 117° 118° 119° 120° 121° 122° 123° 124° 125° 126° 127° 128° 129° 130° 131° 132° 133° 134° 135° 136° 137° 138° 139° 140° 141° 142° 143° 144° 145° 146° 147° 148° 149° 150° 151° 152° 153° 154° 155° 156° 157° 158° 159° 160° 161° 162° 163° 164° 165° 166° 167° 168° 169° 170° 171° 172° 173° 174° 175° 176° 177° 178° 179° 180° 181° 182° 183° 184° 185° 186° 187° 188° 189° 190° 191° 192° 193° 194° 195° 196° 197° 198° 199° 200° 201° 202° 203° 204° 205° 206° 207° 208° 209° 210° 211° 212° 213° 214° 215° 216° 217° 218° 219° 220° 221° 222° 223° 224° 225° 226° 227° 228° 229° 230° 231° 232° 233° 234° 235° 236° 237° 238° 239° 240° 241° 242° 243° 244° 245° 246° 247° 248° 249° 250° 251° 252° 253° 254° 255° 256° 257° 258° 259° 260° 261° 262° 263° 264° 265° 266° 267° 268° 269° 270° 271° 272° 273° 274° 275° 276° 277° 278° 279° 280° 281° 282° 283° 284° 285° 286° 287° 288° 289° 290° 291° 292° 293° 294° 295° 296° 297° 298° 299° 300° 301° 302° 303° 304° 305° 306° 307° 308° 309° 310° 311° 312° 313° 314° 315° 316° 317° 318° 319° 320° 321° 322° 323° 324° 325° 326° 327° 328° 329° 330° 331° 332° 333° 334° 335° 336° 337° 338° 339° 340° 341° 342° 343° 344° 345° 346° 347° 348° 349° 350° 351° 352° 353° 354° 355° 356° 357° 358° 359° 360° 361° 362° 363° 364° 365° 366° 367° 368° 369° 370° 371° 372° 373° 374° 375° 376° 377° 378° 379° 380° 381° 382° 383° 384° 385° 386° 387° 388° 389° 390° 391° 392° 393° 394° 395° 396° 397° 398° 399° 400° 401° 402° 403° 404° 405° 406° 407° 408° 409° 410° 411° 412° 413° 414° 415° 416° 417° 418° 419° 420° 421° 422° 423° 424° 425° 426° 427° 428° 429° 430° 431° 432° 433° 434° 435° 436° 437° 438° 439° 440° 441° 442° 443° 444° 445° 446° 447° 448° 449° 450° 451° 452° 453° 454° 455° 456° 457° 458° 459° 460° 461° 462° 463° 464° 465° 466° 467° 468° 469° 470° 471° 472° 473° 474° 475° 476° 477° 478° 479° 480° 481° 482° 483° 484° 485° 486° 487° 488° 489° 490° 491° 492° 493° 494° 495° 496° 497° 498° 499° 500° 501° 502° 503° 504° 505° 506° 507° 508° 509° 510° 511° 512° 513° 514° 515° 516° 517° 518° 519° 520° 521° 522° 523° 524° 525° 526° 527° 528° 529° 530° 531° 532° 533° 534° 535° 536° 537° 538° 539° 540° 541° 542° 543° 544° 545° 546° 547° 548° 549° 550° 551° 552° 553° 554° 555° 556° 557° 558° 559° 560° 561° 562° 563° 564° 565° 566° 567° 568° 569° 570° 571° 572° 573° 574° 575° 576° 577° 578° 579° 580° 581° 582° 583° 584° 585° 586° 587° 588° 589° 590° 591° 592° 593° 594° 595° 596° 597° 598° 599° 600° 601° 602° 603° 604° 605° 606° 607° 608° 609° 610° 611° 612° 613° 614° 615° 616° 617° 618° 619° 620° 621° 622° 623° 624° 625° 626° 627° 628° 629° 630° 631° 632° 633° 634° 635° 636° 637° 638° 639° 640° 641° 642° 643° 644° 645° 646° 647° 648° 649° 650° 651° 652° 653° 654° 655° 656° 657° 658° 659° 660° 661° 662° 663° 664° 665° 666° 667° 668° 669° 670° 671° 672° 673° 674° 675° 676° 677° 678° 679° 680° 681° 682° 683° 684° 685° 686° 687° 688° 689° 690° 691° 692° 693° 694° 695° 696° 697° 698° 699° 700° 701° 702° 703° 704° 705° 706° 707° 708° 709° 710° 711° 712° 713° 714° 715° 716° 717° 718° 719° 720° 721° 722° 723° 724° 725° 726° 727° 728° 729° 730° 731° 732° 733° 734° 735° 736° 737° 738° 739° 740° 741° 742° 743° 744° 745° 746° 747° 748° 749° 750° 751° 752° 753° 754° 755° 756° 757° 758° 759° 760° 761° 762° 763° 764° 765° 766° 767° 768° 769° 770° 771° 772° 773° 774° 775° 776° 777° 778° 779° 780° 781° 782° 783° 784° 785° 786° 787° 788° 789° 790° 791° 792° 793° 794° 795° 796° 797° 798° 799° 800° 801° 802° 803° 804° 805° 806° 807° 808° 809° 810° 811° 812° 813° 814° 815° 816° 817° 818° 819° 820° 821° 822° 823° 824° 825° 826° 827° 828° 829° 830° 831° 832° 833° 834° 835° 836° 837° 838° 839° 84

DATE: 11/17/2017 11:11:11 AM

TABLA 66															
Edad (años)	CEMENTO P4+PUZOLANA 0			CEMENTO P4+PUZOLANA A			CEMENTO P4+PUZOLANA C			CEMENTO 60 / PUZOLANA 201			CEMENTO 60 / PUZOLANA 201		
	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	80/20	70/30	60/40	(P4+A)	(P4+C)	(P4+0)	(P4+A)	(P4+C)	(P4+0)
7	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
14	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
21	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
28	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
35	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
42	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
49	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
56	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
63	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
70	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
77	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
84	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
91	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
98	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
105	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
112	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
119	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
126	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
133	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
140	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
147	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
154	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
161	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
168	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
175	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
182	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
189	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
196	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
203	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
210	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
217	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
224	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
231	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
238	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
245	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
252	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
259	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
266	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
273	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
280	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
287	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
294	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
301	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
308	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
315	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
322	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
329	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
336	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
343	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
350	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
357	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
364	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
371	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
378	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
385	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
392	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
399	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
406	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
413	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
420	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
427	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
434	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
441	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
448	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
455	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
462	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
469	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
476	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
483	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
490	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
497	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
504	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
511	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
518	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
525	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
532	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
539	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
546	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
553	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
560	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
567	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
574	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.28	54.2	7.21	38.8
581	51.2	7.21	38.8	5.8	71.4	11.2									



• Lote: Cimento Probeta 1410m ASTM C 595-08  
• Probeta 1410m (1) de 10 m: Cimento de 50 kg (1) y 50 kg (1) de 10 m

TABLA 68

• Probeta 1410m (1) de 10 m: Cimento de 50 kg (1) y 50 kg (1) de 10 m  
• Probeta 1410m (1) de 10 m: Cimento de 50 kg (1) y 50 kg (1) de 10 m

PROYECTO DE RECONSTRUCCIÓN DEL PUZOLANA 0																PUZOLANA A																PUZOLANA C																PUZOLANA 0																PUZOLANA A															
Edad (años)	CEMENTO P-1 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-1 / PUZOLANA A			CEMENTO P-1 / PUZOLANA C			CEMENTO P-2 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-2 / PUZOLANA A			CEMENTO P-2 / PUZOLANA C			CEMENTO P-3 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-3 / PUZOLANA A			CEMENTO P-3 / PUZOLANA C			CEMENTO P-4 / PUZOLANA 0			CEMENTO P-4 / PUZOLANA A			CEMENTO P-4 / PUZOLANA C																																													
	60/20	70/30	60/40	60/20	70/30	60/40	60/20	70/30	60/40	60/20	70/30	60/40	60/20	70/30	60/40	60/20	70/30	60/40	60/20	70/30	60/40	60/20	70/30	60/40	60/20	70/30	60/40	60/20	70/30	60/40																																																	
7	20.2	24.3	28.5	11.5	15.5	19.5	12.2	16.2	20.2	13.5	17.5	21.5	14.2	18.2	22.2	25.2	29.2	33.2	16.5	20.5	24.5	17.2	21.2	25.2	18.5	22.5	26.5	19.2	23.2	27.2																																																	
14	25.2	29.2	33.2	16.5	20.5	24.5	17.2	21.2	25.2	18.5	22.5	26.5	19.2	23.2	27.2	30.2	34.2	38.2	21.5	25.5	29.5	22.2	26.2	30.2	23.5	27.5	31.5	24.2	28.2	32.2																																																	
21	30.2	34.2	38.2	21.5	25.5	29.5	22.2	26.2	30.2	23.5	27.5	31.5	24.2	28.2	32.2	35.2	39.2	43.2	26.5	30.5	34.5	27.2	31.2	35.2	28.5	32.5	36.5	29.2	33.2	37.2																																																	
28	35.2	39.2	43.2	26.5	30.5	34.5	27.2	31.2	35.2	28.5	32.5	36.5	29.2	33.2	37.2	40.2	44.2	48.2	31.5	35.5	39.5	32.2	36.2	40.2	33.5	37.5	41.5	34.2	38.2	42.2																																																	
35	40.2	44.2	48.2	31.5	35.5	39.5	32.2	36.2	40.2	33.5	37.5	41.5	34.2	38.2	42.2	45.2	49.2	53.2	36.5	40.5	44.5	37.2	41.2	45.2	38.5	42.5	46.5	39.2	43.2	47.2																																																	
42	45.2	49.2	53.2	36.5	40.5	44.5	37.2	41.2	45.2	38.5	42.5	46.5	39.2	43.2	47.2	50.2	54.2	58.2	41.5	45.5	49.5	42.2	46.2	50.2	43.5	47.5	51.5	44.2	48.2	52.2																																																	
49	50.2	54.2	58.2	41.5	45.5	49.5	42.2	46.2	50.2	43.5	47.5	51.5	44.2	48.2	52.2	55.2	59.2	63.2	46.5	50.5	54.5	47.2	51.2	55.2	48.5	52.5	56.5	49.2	53.2	57.2																																																	
56	55.2	59.2	63.2	46.5	50.5	54.5	47.2	51.2	55.2	48.5	52.5	56.5	49.2	53.2	57.2	60.2	64.2	68.2	51.5	55.5	59.5	52.2	56.2	60.2	53.5	57.5	61.5	54.2	58.2	62.2																																																	
63	60.2	64.2	68.2	51.5	55.5	59.5	52.2	56.2	60.2	53.5	57.5	61.5	54.2	58.2	62.2	65.2	69.2	73.2	56.5	60.5	64.5	57.2	61.2	65.2	58.5	62.5	66.5	59.2	63.2	67.2																																																	
70	65.2	69.2	73.2	56.5	60.5	64.5	57.2	61.2	65.2	58.5	62.5	66.5	59.2	63.2	67.2	70.2	74.2	78.2	61.5	65.5	69.5	62.2	66.2	70.2	63.5	67.5	71.5	64.2	68.2	72.2																																																	
77	70.2	74.2	78.2	61.5	65.5	69.5	62.2	66.2	70.2	63.5	67.5	71.5	64.2	68.2	72.2	75.2	79.2	83.2	66.5	70.5	74.5	67.2	71.2	75.2	68.5	72.5	76.5	69.2	73.2	77.2																																																	
84	75.2	79.2	83.2	66.5	70.5	74.5	67.2	71.2	75.2	68.5	72.5	76.5	69.2	73.2	77.2	80.2	84.2	88.2	71.5	75.5	79.5	72.2	76.2	80.2	73.5	77.5	81.5	74.2	78.2	82.2																																																	
91	80.2	84.2	88.2	71.5	75.5	79.5	72.2	76.2	80.2	73.5	77.5	81.5	74.2	78.2	82.2	85.2	89.2	93.2	76.5	80.5	84.5	77.2	81.2	85.2	80.5	84.5	88.5	81.2	85.2	89.2																																																	
98	85.2	89.2	93.2	76.5	80.5	84.5	77.2	81.2	85.2	80.5	84.5	88.5	81.2	85.2	89.2	92.2	96.2	100.2	81.5	85.5	89.5	82.2	86.2	90.2	83.5	87.5	91.5	84.2	88.2	92.2																																																	
105	90.2	94.2	98.2	81.5	85.5	89.5	82.2	86.2	90.2	83.5	87.5	91.5	84.2	88.2	92.2	95.2	99.2	103.2	86.5	90.5	94.5	87.2	91.2	95.2	90.5	94.5	98.5	91.2	95.2	99.2																																																	
112	95.2	99.2	103.2	86.5	90.5	94.5	87.2	91.2	95.2	90.5	94.5	98.5	91.2	95.2	99.2	102.2	106.2	110.2	91.5	95.5	99.5	92.2	96.2	100.2	93.5	97.5	101.5	94.2	98.2	102.2																																																	
119	100.2	104.2	108.2	91.5	95.5	99.5	92.2	96.2	100.2	93.5	97.5	101.5	94.2	98.2	102.2	105.2	109.2	113.2	96.5	100.5	104.5	97.2	101.2	105.2	100.5	104.5	108.5	101.2	105.2	109.2																																																	
126	105.2	109.2	113.2	96.5	100.5	104.5	97.2	101.2	105.2	100.5	104.5	108.5	101.2	105.2	109.2	112.2	116.2	120.2	101.5	105.5	109.5	102.2	106.2	110.2	103.5	107.5	111.5	104.2	108.2	112.2																																																	
133	110.2	114.2	118.2	101.5	105.5	109.5	102.2	106.2	110.2	103.5	107.5	111.5	104.2	108.2	112.2	115.2	119.2	123.2	106.5	110.5	114.5	107.2	111.2	115.2	110.5	114.5	118.5	111.2	115.2	119.2																																																	
140	115.2	119.2	123.2	106.5	110.5	114.5	107.2	111.2	115.2	110.5	114.5	118.5	111.2	115.2	119.2	122.2	126.2	130.2	111.5	115.5	119.5	112.2	116.2	120.2	113.5	117.5	121.5	114.2	118.2	122.2																																																	
147	120.2	124.2	128.2	111.5	115.5	119.5	112.2	116.2	120.2	113.5	117.5	121.5	114.2	118.2	122.2	125.2	129.2	133.2	116.5	120.5	124.5	117.2	121.2	125.2	120.5	124.5	128.5	121.2	125.2	129.2																																																	
154	125.2	129.2	133.2	116.5	120.5	124.5	117.2	121.2	125.2	120.5	124.5	128.5	121.2	125.2	129.2	132.2	136.2	140.2	121.5	125.5	129.5	122.2	126.2	130.2	123.5	127.5	131.5	124.2	128.2	132.2																																																	
161	130.2	134.2	138.2	121.5	125.5	129.5	122.2	126.2	130.2	123.5	127.5	131.5	124.2	128.2	132.2	135.2	139.2	143.2	126.5	130.5	134.5	127.2	131.2	135.2	130.5	134.5	138.5	131.2	135.2	139.2																																																	
168	135.2	139.2	143.2	126.5	130.5	134.5	127.2	131.2	135.2	130.5	134.5	138.5	131.2	135.2	139.2	142.2	146.2	150.2	131.5	135.5	139.5	132.2	136.2	140.2	133.5	137.5	141.5	134.2	138.2	142.2																																																	
175	140.2	144.2	148.2	131.5	135.5	139.5	132.2	136.2	140.2	133.5	137.5	141.5	134.2	138.2	142.2	145.2	149.2	153.2	136.5	140.5	144.5	137.2	141.2	145.2	140.5	144.5	148.5	141.2	145.2	149.2																																																	
182	145.2	149.2	153.2	136.5	140.5	144.5	137.2	141.2	145.2	140.5	144.5	148.5	141.2	145.2	149.2	152.2	156.2	160.2	141.5	145.5	149.5	142.2	146.2	150.2	143.5	147.5	151.5	144.2	148.2	152.2																																																	
189	150.2	154.2	158.2	141.5	145.5	149.5	142.2	146.2	150.2	143.5	147.5	151.5	144.2	148.2	152.2	155.2	159.2	163.2	146.5	150.5	154.5	147.2	151.2	155.2	150.5	154.5	158.5	151.2	155.2	159.2																																																	
196	155.2	159.2	163.2	146.5	150.5	154.5	147.2	151.2	155.2	150.5	154.5	158.5	151.2	155.2	159.2	162.2	166.2	170.2	151.5	155.5	159.5	152.2	156.2	160.2	153.5	157.5	161.5	154.2	158.2	162.2																																																	
203	160.2	164.2	168.2	151.5	155.5	159.5	152.2	156.2	160.2	153.5	157.5	161.5	154.2	158.2	162.2	165.2	169.2	173.2	156.5	160.5	164.5	157.2	161.2	165.2	160.5	164.5	168.5	161.2	165.2	169.2																																																	
210	165.2	169.2	173.2	156.5	160.5	164.5	157.2	161.2	165.2	160.5	164.5	168.5	161.2	165.2	169.2	172.2	176.2	180.2	161.5	165.5	169.5	162.2	166.2	170.2	163.5	167.5	171.5	164.2	168.2	172.2																																																	
217	170.2	174.2	178.2	161.5	165.5	169.5	162.2	166.2	170.2	163.5	167.5	171.5	164.2	168.2	172.2	175.2	179.2	183.2	166.5	170.5	174.5	167.2	171.2	175.2	170.5	174.5	178.5	171.2	175.2	179.2																																																	
224	175.2	179.2	183.2	166.5	170.5	174.5	167.2	171.2	175.2	170.5	174.5	178.5	171.2	175.2	179.2	182.2	186.2	190.2	171.5	175.5	179.5	172.2	176.2	180.2	173.5	177.5	181.5	174.2	178.2	182.2																																																	
231	180.2	184.2	188.2	171.5	175.5	179.5	172.2	176.2	180.2	173.5	177.5	181.5	174.2	178.2	182.2	185.2	189.2	193.2	176.5	180.5	184.5	177.2	181.2	185.2	180.5	184.5	188.5	181.2	185.2	189.2																																																	
238	185.2	189.2	193.2	176.5	180.5	184.5	177.2	181.2	185.2	180.5	184.5	188.5	181.2	185.2	189.2	192.2	196.2	200.2	181.5	185.5	189.5	182.2	186.2	190.2	183.5	187.5	191.5	184.2	188.2	192.2																																																	
245	190.2	194.2	198.2	181.5	185.5	189.5	182.2	186.2	190.2	183.5	187.5	191.5	184.2	188.2	192.2	195.2	199.2	203.2	186.5	190.5	194.5	187.2	191.2	195.2	190.5	194.5	198.5	191.2	195.2	199.2																																																	
252	195.2	199.2	203.2	186.5	190.5	194.5	187.2	191.2	195.2	190.5	194.5	198.5	191.2	195.2	199.2	202.2	206.2	210.2	191.5	195.5	199.5	192.2	196.2	200.2	193.5	197.5	201.5	194.2	198.2	202.2																																																	
259	200.2	204.2	208.2	191.5	195.5	199.5	192.2	196.2	200.2	193.5	197.5	201.5	194.2	198.2	202.2	205.2	209.2	213.2	196.5	200.5	204.5	197.2	201.2	205.2	200.5	204.5	208.5	201.2	205.2	209.2																																																	
266	205.2	209.2	213.2	196.5	200.5	204.5	197.2	201.2	205.2	200.5	204.5	208.5	201.2	205.2	209.2	212.2	216.2	220.2	201.5	205.5	209.5	202.2	206.2	210.2	203.5																																																						

VIII.2.2.2.7.- Estudio Comparativo de las Puzolanas, D, N, O, A, C, M, CV-10 y CV-19.

Discusión VIII.2.2.2.7 (E) y (F)

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$ , véase Tablas 26, 32, 41, 48, 55 y 56.

1ª.- Valen aquí íntegramente las Discusiones anteriores VIII.2.2.2.2 (E) 1ª, VIII.2.2.2.3 (E), VIII.2.2.2.4 (E) y VIII.2.2.2.5 (E), las cuales refundidas quedan como sigue:

En general se observa como la evolución de los valores del  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$  de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ así ensayados y comparados, divide a las distintas familias de los mismos en dos grupos claramente diferenciados, sea cual fuere el cemento portland matriz, P ó PY, que los constituya,

- uno formado por aquellas familias de cementos de mezcla, en las que tal evolución de los valores de  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respectivas, es relativamente similar, -aunque por lo general inferior en valor absoluto-, a la de su cemento portland matriz acompañante correspondiente, P ó PY solo, deteniéndose poco a poco su crecimiento hasta hacerse prácticamente constante a la par que la de este último, o lo que es lo mismo, que la  $V_{cl}$  de las probetas tanto de aquellos como de éste solo, alcanza por lo común su máximo valor en los primeros 14 días del ensayo para minimizarse lentamente a la edad de 28 ó 60 días del mismo, como así ha ocurrido con las familias de las puzolanas D y N.

- otro formado por aquellas otras familias de cementos de mezcla, en los que la evolución de los valores del  $\bar{\Delta}L$  y  $V_{cl}$  de sus probetas respectivas, es totalmente contraria a la de su cemento portland matriz acompañante correspondiente solo, de tal modo que por lo común,

. a las edades iniciales del ensayo, y en especial la de 7 días, los valores de  $\bar{\Delta}L$  de aquellos son superiores, -a veces notablemente-, a los de aquél solo, manteniéndose prácticamente constantes hasta el final del mismo, para el caso de que dicho cemento portland matriz acompañante haya sido de nulo contenido de  $C_3A$ , y

. a las edades siguientes y/o posteriores, ocurre lo contrario, por estancamiento de los de aquellos y progresión, en su

caso de la de este último, cuando ha sido de contenido elevado o mediano de  $C_3A$ ; habiéndose producido, a igualdad de cemento de mezcla, la superación de éste sobre aquéllos, tanto mas pronto cuanto mayor ha sido el contenido de  $C_3A$  de aquél y el  $Al_2O_3$  de la puzolana, es decir, en definitiva que la  $Vcl$  de las probetas de aquellos, a diferencia de la de éste solo, ya vista anteriormente, alcanzan comúnmente su máximo valor en los primeros 7 días siguientes, o sea, a la edad de 14 días, como así ha ocurrido en mayor o menor medida con las familias del resto de las puzolanas comparadas, O, A, C, M, CV-10 y CV-19

2ª.- Las clasificaciones que se obtienen a igualdad de

- edad fundamental del ensayo de 7, 14, 28, 365 y 730 días,
- cemento de mezcla PA y/o PUZ, y
- cemento portland matriz acompañante común P ó PY respectivamente

de las puzolanas citadas, así ensayadas (ASTM C 452-68) y comparadas -entre sí y respecto a su cemento portland matriz acompañante común P ó PY solo-, en función del valor, de menor a mayor por este orden, de  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respectivas, se encuentran en la Tabla 71.

3ª.- En general se puede decir que el orden de magnitud y evolución en horizontal y en vertical de los valores de  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$  de cada familia de cementos de mezcla comparada, divide a todas ellas en dos grupos,

- uno formado por las familias de cementos de mezcla PA y PUZ de las puzolanas D, N y O, grupo 1ª, y
- otro formado por las familias de cementos de mezcla PA y PUZ de las puzolanas A, C y M, grupo 2ª,

es decir,

a) en el supuesto de que el cemento portland matriz acompañante sea de elevado contenido de  $C_3A$ , caso del P-1 y P-2,

- el 1ª, en el que impera el efecto químico inverso de la sustitución física de cemento portland por puzolana, y
- el 2ª, en el que impera el efecto contrario, es decir, el directo de la sustitución física de cemento portland por puzolana, y

b) en el supuesto de que el cemento portland matriz acompañante sea de contenido mediano, caso del P-31 ó prácticamente nulo de  $C_3A$ , caso del PY-4 y PY-6, tanto en el primero (menos la puzolana D) como en el segundo grupo, se puede decir que impera el efecto químico directo de la sustitución física, es decir, prácticamente no se produce separación de las puzolanas citadas en grupos diversos.

No obstante, entrando en algo mas de detalle en el estudio de los valores del parámetro Vcl obtenidos en cada caso, por su probable trascendencia, se tiene que:

3<sup>a</sup>.1.- En el caso de que el cemento portland matriz constituyente ha sido el P-1:

- a) a la edad de 7 días se observa como todas las puzolanas comparadas se agrupan a tal edad en dos grupos,
  - uno, en el que la Vcl disminuye con la adición de puzolana, como es el caso de la D y O, y
  - otro, en el que la Vcl aumenta con la adición de puzolana, como es el caso de la N, A, C y M,
- b) a la edad de 14 días: se observa como, a igualdad de cemento de mezcla, la evolución de los valores de la Vcl se parece mas a la de su cemento portland matriz P-1 solo, conforme menos  $Al_2O_3$  (y probablemente  $Al_2O_3^-$ ) tiene la puzolana, y viceversa,
- c) a la edad de 21 días: se observa como a esta edad, la Vcl disminuye minimizándose con la adición de puzolana en todos los casos, menos en el caso de la M, siendo tal orden de disminución, a igualdad de cemento de mezcla, el siguiente

> Vcl >	D > N > A > O > M > C	a 21 días
---------	-----------------------	-----------

reagrupándose mas claramente si cabe por el orden de magnitud en tres grupos:

- el 1<sup>o</sup> subgrupo formado por las puzolanas D y N,
- el 2<sup>o</sup> " " " " " O y A, y
- el 3<sup>o</sup> " " " " " M y C ó C y M

d) al resto de las edades del ensayo no ocurre hecho destacable alguno dado que los valores de Vcl alcanzados en todos los casos son a partir de la edad anterior exclusive, prácticamente despreciables.

3\*.2.- En el caso de que el cemento portland matriz constituyente ha sido el P-2 : Se puede decir que ocurre al igual que en el caso anterior del P-1, con la única paradoja destacable aquí, de que en el caso de la puzolana A ocurre en esta ocasión lo contrario que en aquélla, es decir, que sus valores de dicho parámetro disminuyen (no aumentan como aquél), con la adición de dicha puzolana.

3\*.3.- En el caso de que el cemento portland matriz constituyente ha sido el P-31 : Se puede decir que en principio ocurre otro tanto al igual que en los casos anteriores del P-1 y P-2, pero que conforme transcurre el ensayo y precisamente a la edad de 28 días del mismo, dichas puzolanas se reagrupan de nuevo en dos subgrupos,  
- uno, formado por las puzolanas D, N y O, y  
- otro, formado por el resto, A, C y M,  
siendo el orden de magnitud de ambos subgrupos distinto, en favor lógicamente de las de este último.

Finalmente no se ha de olvidar a las puzolanas CV-10 y CV-19, que por los valores de  $V_{cl}$  alcanzados por sus respectivas probetas no pueden considerarse como formadoras de subgrupo propio individualizado, sino mas bien como nexo de unión entre las puzolanas de los dos subgrupos anteriores citados, ya que los máximos valores de la primera, CV-10, se encuentran a igualdad de edad, cemento de mezcla y agua de amasado, comprendidos entre los de la C y la M, por este orden, y los de la - CV-19, entre los de la O y la A, por este orden.

3\*.4.- En el caso de que el cemento portland matriz constituyente ha sido el PY-4 y PY-6, respectivamente : Lógicamente se ha de decir aquí otro tanto a lo dicho al principio para el caso de su parámetro originario,  $\bar{\alpha}L$ , no obstante, cabe resaltar que en este caso, a igualdad de edad de 7 días, cemento de mezcla y agua de amasado, el valor de la  $V_{cl}$  de las probetas respectivas va aumentando de la puzolana D a la M, pasando por la N, O, A y C, por ese orden.

Por otra parte, la disminución de los valores del mismo en cada caso, desde la edad inicial del ensayo de 7 días,

es similar en orden de magnitud para el caso de las puzolanas silícicas D, N, (y sentido contrario), que no para el resto, O, A, C y M, en las que tanto el orden de magnitud como el sentido son diferentes entre sí y respecto a aquella D, alcanzándose el máximo valor correspondiente a la edad de 7 días en todos los casos, y siendo el resto de los valores correspondientes tanto mas despreciables conforme transcurre el ensayo.

- 4ª.- Se ha de destacar finalmente que tan sólo para el caso de la puzolana M se han alcanzado paradójicamente menores valores de  $V_{cl}$  con el cemento portland matriz acompañante PY-6 que con el PY-4.

Discusión VIII.2.2.2.7 (cont.)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta$ RMF,  $\Delta$ RMC,  $V_{c4RMF}$  y  $V_{c4RMC}$ , véase Tablas  
28, 29, 34, 35, 36, 41, 42, 43, 49, 50, 51, 57, 58, 59  
60, 61 y 62.

- 1ª.- Valen aquí íntegramente las discusiones anteriores, VIII.2.2.2.2.(F) 1ª, VIII.2.2.2.3(F), 1ª, VIII.2.2.2.4(F), 1ª y VIII.2.2.2.5(F), 1ª.

- 2ª.- Las clasificaciones que se obtienen a igualdad de

- edad fundamental del ensayo de 7, 14, 21, 28, 365 y 730 días,
  - cemento de mezcla PA y/o PUZ,
  - cemento portland matriz acompañante común P ó PY respectivamente, y
  - agua de amasado, d,
- de las puzolanas citadas así ensayadas y comparadas entre sí y respecto a su cemento portland matriz acompañante común P ó PY solo, en función del valor, de menor a mayor por este orden, de la RMF ó RMC, respectivamente, de sus probetas respectivas, se encuentran en la Tabla 72.

De las clasificaciones obtenidas de las puzolanas elegidas para la realización de este trabajo, en función de estos parámetros RMF y RMC, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- 1ª.- El número de clasificaciones obtenidas mediante el parámetro RMF y que son relativamente coincidentes con las obtenidas mediante

a) el contenido de  $Al_2O_3^{F-}$  y/o MF

- b) el contenido probable de  $Al_2O_3$  de cada
- c) el ensayo de Frattini
- d) las conclusiones de la POP
- e) los resultados ( $\Delta\phi$ ) del L-A y
- f) los resultados ( $\Delta L$ ) del ASTM C 452

- es bastante mayor que el de las obtenidas mediante el parámetro EMC (32% respectivamente), y
- es bastante mayor en los cementos de mezcla PUZ 60/40, que en los 70/30 hermanos, y que en los 80/20 hermanos, existiendo sólo una en este último caso.

2ª.- Por lo general de todas las clasificaciones obtenidas, cumplan o no con la conclusión anterior,

- las puzolanas C y M por este orden, suelen ocupar en casi todos los casos el extremo derecho de las mismas,
- las puzolanas D y N ó N y D, suelen ocupar el extremo izquierdo de las mismas, y
- las puzolanas O y A ó A y O, suelen ocupar las posiciones intermedias.

#### Discusión VIII.2.2.2.7 (cont.)

(G) Parámetro: Porosidad, véase Tablas 37, 44, 52, 53, 64 y 28.

Antes de entrar en este estudio comparativo en la discusión de los valores de este parámetro Porosidad, se ha de hacer constar que dadas las características morfológicas tan específicas de las puzolanas A y N, "estuches huecos", las mismas, o mejor sus probetas de mortero correspondientes no se incluirán en aquél dado que los valores del mismo no son lógicamente comparables.

1ª.- Valen aquí íntegramente las partes afines de las discusiones anteriores VIII.2.2.2.2.2.(G), 1ª, VIII.2.2.2.3.(G), 1ª, VIII.2.2.2.5 (G), 1ª.

2ª.- Valen aquí íntegramente las partes afines de las discusiones anteriores VIII.2.2.2.2.2.(G), 2ª, VIII.2.2.2.3.(G), 2ª, VIII.2.2.2.4.(G), 2ª, VIII.2.2.2.5.(G), 2ª.

3ª.- A igualdad de edades iniciales (7, 14, 21 y 28 días) y finales (365 y 730 días), del ensayo y cemento de mezcla del cemento portland matriz constituyente común P ó PY, las clasificaciones que se obtendrían de las puzolanas O, A, C y M en función de los valores de este parámetro Porosidad de sus probetas respectivas, de menor a mayor valor, por este orden, resultarían muy distintas, de tal modo que no se ha podido establecer regla

general alguna, independientemente del cemento portland matriz acompañante.

4ª.- Vale aquí íntegramente la discusión VIII.2.2.2.3(G), 3ª correspondiente a la puzolana M.

5ª.- Vale aquí íntegramente la discusión VIII.2.2.2.3(G), 4ª correspondiente a la puzolana M.

Discusión VIII.2.2.2.7 (cont.)

(H) Parámetros: Vu,  $\Delta Vu$  y  $Vc \Delta Vu$ , véase Tablas 28, 30, 37, 38, 44, 45, 52, 53, 65 y 66.

Vale aquí íntegramente lo expuesto al inicio de la discusión VIII.2.2.2. (cont.) del parámetro Porosidad.

1ª.- Valen aquí íntegramente las partes afines de las discusiones anteriores VIII.2.2.2.2.2.(H) 1ª, VIII.2.2.2.3(H) 1ª, VIII.2.2.2.4(H) 1ª, y VIII.2.2.2.5(H) 1ª.

2ª.- Valen aquí íntegramente, las partes afines de las discusiones anteriores VIII.2.2.2.2.2.(H) 2ª, VIII.2.2.2.3(H) 2ª, VIII.2.2.2.4(H) 2ª, y VIII.2.2.2.5(H) 2ª.

Interpretación VIII.2.2.2.7 (E)(F)(G)(H)(I)

Antes de entrar en la presente interpretación se ha de tener en cuenta toda la Interpretación VIII.2.2.2.6. Por otra parte y en cuanto a la forma de llevarla a cabo, se ha de hacer constar que en la medida de lo posible se realizará englobando todos los parámetros en el desarrollo puntualizado de la correspondiente al parámetro  $\bar{\Delta L}$ . No obstante y en caso de especial relevancia, se realizará individualizadamente de aquél(los) que se juzgue(n) mas oportuno(s). Así pues se tiene :

De la Discusión 1ª (E): Todo ello es consecuencia directísima de la conocida competitividad manifiesta existente entre el  $C_3 A$  y el  $Al_2 O_3^r$  de la fracción cemento portland X y puzolana Y, respectivamente, en cada caso y edad del ensayo, (véase Interpretación VIII.1.2.2.3 (E) de la 3ª discusión), por la fijación en esta ocasión del 7,0% de  $SO_3$  inicial puéstoles como agresivo común, de tal manera que, en este método de ensayo ASTM C 452 se verifica que:

(a) Si la del primero, es mínima ó nula, o sea  $\% C_3 A = 0,00$ , y la del segundo es máxima, o sea,  $\% Al_2 O_3^r = \text{máximo}$ ,



- i) los valores del  $\bar{\Delta}L$  de las probetas del cemento portland matriz acompañante respectivo solo, deberán ser pequeños y prácticamente constantes a lo largo del ensayo, mientras que los de la Vcl además de pequeños, deberán disminuir con el transcurso del ensayo; y otro tanto deberá ocurrir relativamente con la constancia, con los de porosidad y Vu, que no con los de RMF, RMC y  $SO_4^{=}$  lcp que aumentarán apreciablemente con aquél.
  - ii) los valores del  $\bar{\Delta}L$  de las de sus cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes, deberán ser, ya a la edad de 7 días al menos, tanto mayores conforme mayor sea el contenido de  $Al_2O_3^{=}$  de la puzolana, debiendo disminuir por ello tanto más rápidamente los de la Vcl correspondientes y al contrario con los valores de los parámetros Porosidad y  $SO_4^{=}$  lcp; debiéndose de mantener dicha relación entre ambos hasta la finalización del mismo, como así ha ocurrido en este trabajo con las familias PY-4/Puzolana X y PY-6/Puzolana X; y
- (b) Si la del primero, es máxima, o sea %  $C_3A$  elevado, y la del segundo es mínima, o sea, %  $Al_2O_3^{=}$   $\approx$  0,00, ambos valores del  $\bar{\Delta}L$ , RMF, RMC y Vu de sus probetas respectivas, cemento portland matriz acompañante común solo y cementos de mezcla PA y/o PUZ correspondientes, deberán evolucionar y mantenerse a lo largo de todo el ensayo, en relación totalmente contraria al caso anterior, es decir, los valores del  $\bar{\Delta}L$ , RMF y RMC de los primeros (minoría de  $SO_4^{=}$  lcp) son mayores en valor absoluto (cementos portland matrices respectivos solos) que los de los segundos (cementos de mezcla correspondientes), pues como se podrá recordar por el apartado VIII.2.2.2.1.2., en tales casos la puzolana en cuestión deberá actuar en igual sentido, y mayor aún, que si de un simple INERTE<sub>RS</sub> y RM se tratare, mientras que las de la Vcl deberán disminuir por tanto más lentamente que en el caso anterior, alcanzando el valor máximo del mismo en los primeros 28 días de ensayo, como así ha ocurrido también en este trabajo con las familias P-nº/D ó N 80/20, 70/30 y 60/40 y
- (c) Si la del primero,  $C_3A$ , y segundo,  $Al_2O_3^{=}$ , son variables sin llegar a maximizarse y minimizarse, respectivamente, o viceversa, deberán producirse múltiples y variadas situaciones posibles intermedias a las de los dos casos extremos anteriores citados (a) y (b), como así también ha ocurrido en este trabajo con el resto de las familias P-nº ó PY-nº/0, A ó C 80/20, 70/30 y 60/40, y P-31/CV-10 ó CV-19 70/30.

debiéndose destacar de entre todos ellos, (a), (b) y (c), aquéllos -lógicamente los mas numeros- pertenecientes a los grupos (a) y (c), en especial estos últimos, en los que si la puzolana en cuestión se mezclare con,

- un cemento portland de contenido de  $C_3A$  escaso a prácticamente nulo, el  $\bar{\Delta L}$  de las probetas del(los) cemento(s) de mezcla resultante(s), es mayor, hasta la edad de 28 días, al menos, al de aquél solo. ó

- un cemento portland de contenido mediano a elevado de  $C_3A$ , el  $\bar{\Delta L}$  de las probetas del(los) cemento(s) de mezcla resultante(s), es menor, al menos durante las edades intermedias y finales del ensayo, o sea, mas o menos desde la edad de 60 días en adelante al de aquél solo,

en cuyo caso resultará que los valores del  $\bar{\Delta L}$  de los cementos de mezcla PA y PUZ de tal(es) puzolana(s) y similares -que lógicamente deberán ser la mayoría- respecto al del cemento portland matriz acompañante solo de elevado contenido de  $C_3A$  con el que se coaliguen, da pie para poder confirmar, por los resultados obtenidos en igual caso mediante el método L-A) el comportamiento de aquellas , referente a que las mismas, y desde el punto de vista de la RS, poseen un único comportamiento manifestable en aquellos en cuantía y forma totalmente distintas según sea P ó PY el cemento portland matriz que las acompañe en cada caso.

Y como ejemplos concretos del último caso posible (c) se tienen los correspondientes a las puzolanas O, A y C, por un lado, y CV-10 y CV-19 por otro, cuya interpretación respectiva, según todo lo anterior, sería la siguiente:

(c).1.- Caso de las Puzolanas O, A y C :

(E) = ( $\bar{\Delta L}$  y Vcl): En este caso se puede aplicar para todas las discusiones expuestas, similar idea matriz que se aplicó para el caso de la puzolana referencial aluminica M, es decir, que lo ocurrido se debe a la "competencia" existente en cada caso, entre el  $C_3A$  y el  $Al_2O_3^r$  correspondientes, por la fijación del 7,0% de  $SO_3$  inicial puéstoles como agresivo común, de tal modo que en razón de la estequiometría y velocidades de formación de sus respectivas ettringitas, éstas serán mayoritariamente de uno a otro origen, según la edad del ensayo, con sus consecuencias expansoras, "calidad" (Vcl) y "cantidad" ( $\bar{\Delta L}$ ), correspondientes.

De aquí que en el supuesto de que la competitividad del  $C_3A$  disminuyera hasta anularse teóricamente, mediante el empleo en todos los casos de un cemento portland matriz acompañante común de contenido prácticamente nulo de  $C_3A$ , caso del PY-4 y PY-6, las expansiones producidas habrán de ser achacables mayoritariamente a la  $ett-rf$  ó de origen  $Al_2O_3^{F-}$  de cada puzolana. Por ello tales expansiones deberán de ser un fiel reflejo de tal contenido respectivo. Por tanto, la clasificación que se debería obtener en función de dicho probable contenido de  $Al_2O_3^{F-}$  de las mismas, de menor a mayor por este orden, deberá de ser la siguiente:

$$Al_2O_3^{F-} (\%) C < Al_2O_3^{F-} (\%) A < Al_2O_3^{F-} (\%) C$$

Interpretación VIII.2.2.2.7. (cont.)

(F) = (RMF, RMC y derivados correspondientes), (G) = (Poros) y (H) = (Vu y derivados correspondientes), pero siguiendo el orden de la discusión de los primeros:

De la Discusión 1ª : Aquí hay que aplicar idéntica razón dada para el caso de los cementos portland matrices P ó PY solos con la matizaciones proporcionales correspondientes de las influencias de las puzolanas ya estudiadas D y N ó M, respectivamente.

De la Discusión 2ª, y parte de la 3ª : Aquí hay que aplicar idéntica razón dada a las discusiones correspondientes al estudio comparativo de las puzolanas D, N y M, de donde se deduce que estas puzolanas a la edad de 1 día, también se comportan como un  $INERTE_{PM}$ .

Y respecto a las anomalías mostradas por la puzolana C a la edad de 7 días, y siguientes iniciales, al producirse éstas en el mismo sentido ya estudiado que le ocurriese en igual situación y más comúnmente a la puzolana M, dan pie a pensar con fundamento que en cierta medida o aspecto, esta puzolana C guarda un relativo "parentesco" ó "cercanía" con la M y viceversa, lo cual es coincidente con las conclusiones correspondientes:

- a) del AQ (visto)
- b) del ensayo de Fratini (visto)
- c) de la POP (visto)
- d) del ensayo de L-A,  $\Delta\emptyset$  (visto)
- e) del ensayo ASTM C 452,  $\bar{\Delta}L$ , (visto), y
- d) del ensayo H-1.4 (que se verá más adelante)

aunque no obstante pese a ser tal "parentesco", junto con el de la CV-10, el mayor de todas las puzolanas aquí ensayadas, el mismo no lo debe ser muy elevado, pues el comportamiento ulterior, a 730 días, de dichas puzolanas C y CV-10, a diferencia con la M en RMF, RMC y sus parámetros derivados, ha resultado ser más constante y de menor valor absoluto que el de la O y A. Y ello puede deberse,

- o bien a la facultad expansora y sobre todo colmatante de la, al parecer, mayor cantidad de ett-rf que aquellas, C y CV-10, podrían formar sobre éstas, O y A, por su relativo mayor parentesco con la M, la cual impediría, por la menor porosidad inicial provocada en sus probetas respectivas, véase Tablas 45, 52, 63, 64, la hidratación ulterior y más completa de la fracción cemento portland matriz acompañante correspondiente, el cual por todo lo contrario, se podría hidratar por lo tanto más, ulteriormente, en el caso de la O y A, pudiendo por ello originar un crecimiento gradativo de tales valores hasta llegar a superar incluso al relativamente estancado de las puzolanas C y CV-10. No obstante en contra de esta hipótesis existe el hecho contundente y claro de que eso mismo y con mayor razón aún debería haber ocurrido en todos los casos 80/20, 70/30 y 60/40 con la puzolana M, y no sólo no ha ocurrido sino que ha ocurrido todo lo contrario, es decir, a igualdad de todo lo demás, mayores valores de  $RM_{730\text{ d.}}$  alcanzados - con la adición de la puzolana M,

- ó bien a la razón apuntada referente al apreciable mayor contenido de  $Na^+$  y  $K^+$ , en particular de la puzolana C sobre el resto, y sus consecuencias correspondientes a cada caso, es decir, probable menor  $[CaO]$  en la fase líquida correspondiente, con posible,

- menor hidraulicidad del sistema torta y mortero(s), correspondientes, y/o

- menor formación de ett-rf ( que no quizás  $C_4AH_{13}$  colmante y no expansivo), que la que en teoría debiera formarse, y consiguientemente posible menor  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respectivas, como así ha ocurrido en este trabajo,

la cual parece ser la hipótesis más verosímil de ambas, puesto que sobre todo los ensayos de,

- Fratini, interpretación VI.1.2.1.2., 1º (c), Agrupación G, y conclusión VI.1.2.1.2., 1º (c), 3º (Fratinis) (visto),
- L-A, interpretación VIII.1.2.2.3. (E), 4º (b). 1.4., (visto), e
- H-1, interpretación VIII.3.3.2.1. (E) (F) (I), (se verá más adelante)

y en especial estos dos últimos - porque resultan ser menos ficticios y por tanto más fidedignos, para poder mostrar el verdadero comportamiento de una puzolana, dado su notable mayor contenido inicial de  $\text{SO}_3$  agresivo para dicho fin que el ASTM C 452 -, así nos lo confirman, al haber tenido la puzolana C en ambos, y con cementos P especialmente, un mejor comportamiento en RS, sin llegar a ser óptimo. que la O y A, véase Tablas 22 y 73, y sin llegar a ser por tanto el tan nocivo que en teoría debería corresponderle por su mayor "parentesco" citado, con la M; por todo ello, ha de serle adscribible al mayor contenido de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , fundamentalmente, de la misma, el que su probable mayor contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  que la A y O, por este orden, no logre quizás llegar a formar toda la etf-rf que sería capaz aunque si bastante, en la ausencia de los mismos, y consiguientemente noseauto-destruyan como se verá, y en su caso, las probetas correspondientes del ensayo L-A y H-1, antes que las de la O y A por este orden, o no origine una mayor expansión-colmatación iniciales y consiguientemente mayores valores de  $\bar{\Delta}L$ , RMF, RMC y Vu (menores de Porosidad y  $\text{SO}_4^= \text{lcp}$ ) en las probetas correspondientes de este ensayo ASTM C 452. Y como prueba adicional de ello está el hecho de que en el ensayo H-1 las probetas de la puzolana O, o sea, las del cemento de mezcla (P-1/O 60/40) se han auto-destruido algo después (de 30 a 60 días después) que las de la A, (P-1/A 60/40), cuando teóricamente debería haber ocurrido lo contrario, pues el probable ligero mayor contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la A sobre la O, dejaría menos  $\text{SO}_3$  del 21,0% inicial, para la misma cantidad de  $\text{C}_3\text{A}$  de la fracción cemento portland P-1 común que las acompaña por cuya causa se debería auto-destruir algo después y no al contrario como ha ocurrido. ; Y que casualidad, en este nuevo caso comparado, la puzolana O muestra un contenido de alcalinos,  $\text{Na}_2\text{O}$  (%) +  $\text{K}_2\text{O}$  (%),

también mayor que el de la A,  $3,18\% + 2,40\% = 5,58\%$ , contra,  $1,24\% + 0,44\% = 1,68\%$ , respectivamente ! Y otro tanto se puede decir que ha ocurrido con la puzolana CV-10 respecto a la CV-19.

Por todo lo cual se puede admitir con fundamento que el ligero mejor comportamiento, dentro de lo malo, de la puzolana C, respecto al que en teoría debería corresponderle por su mayor parentesco relativo con la M, se ha de deber a su mayor contenido de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  que las demás, en especial que la O y A; no pudiéndose precisar, mediante este trabajo, si dicho comportamiento de aquella en RS, hubiese dejado de ser nocivo, para pasar a ser bueno, sin más que el contenido endógeno de la misma o exógeno (de origen externo) de su(s) cemento(s) (de mezcla PA y/o PUZ correspondientes) hubiese sido superior, o mejor quizás, si el cociente :  $\frac{\text{Na}_2\text{O} (\%) + \text{K}_2\text{O} (\%)}{\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{F-}} (\%)}$ , hubiese sido el adecuado en cada caso para

dicho fin (pero quizás ya no adecuado, por originarse otros - problemas subsidiarios de reacción álcal-árido que lo desaconsejasen pese adicha mejoría en RS), pudiendo aún incluso extrapolarse esta(s) hipótesis al resto de las puzolanas, en especial las silico-aluminosas, aluminio-silícicas y aluminicas (y las correspondientes con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en lugar de  $\text{SiO}_2$ ). No obstante y en cualquier caso, lo único verdaderamente importante es que todo ello es del suficiente interés cuali y cuantitativo como para poder tener tratamiento propio fuera del tema de este trabajo.

De la Discusión 4\*.- Ello probablemente se deba a que al ser la puzolana C parecida en cierta medida a la M, podría mostrar acción sinérgica, sólo en determinados casos (aquellos en los que el  $\text{C}_3\text{A}$  esté presente en la cantidad precisa para ello, caso de los cementos de mezcla de cemento, portland matriz acompañante P-1), con sus consecuencias tecnológicas en RMF, RMC y colmatación correspondientes, como así ha ocurrido en este trabajo. Esta colmatación llevaría al mortero de sus probetas a la interpretación dada en el caso anterior.

Por el mismo motivo cualquiera otra puzolana de bastante menor parentesco a la M, bastante menor acción sinérgica

podrá mostrar, y si en cambio efecto de un  $\text{INERTE}_{\text{RM}}$ , como así ha ocurrido en este trabajo. Ello podrá explicar que el comportamiento de las probetas correspondientes, merced a la interpretación del punto anterior, sea el opuesto, como así también ha ocurrido en este trabajo.

(I)  $\text{SO}_4^=$  y derivado correspondiente:

Todo ello queda implícitamente razonado en la interpretación VIII.2.2.2.7 (E) (F) (G) (H) e (I), 1ª. No obstante lo que realmente cabe destacar aquí, es que la clasificación de las puzolanas O, A y C, véase Tabla 71, coincide prácticamente con las correspondientes de la POP, ensayo de L-A, ensayo ASTM C 452,  $\bar{\Delta}L$ , RMF y RMC (ya vistos todos ellos), y ensayo H-1,  $\bar{\Delta}L$ , RMF y RMC (que se verá más adelante).

(c).2.- Caso de las Puzolanas CV-10 y CV-19 :

Todo ello se debe una vez más a que la  $V_f$  de la ett-rf es superior a la  $V_f$  de la ett-lf, cuyo  $C_3A$  originario en este caso no debe ser el suficiente como para competir individualmente con probabilidades de éxito y superación en la fijación del 7,0% de  $\text{SO}_3$  inicial, con el  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  correspondiente a cada puzolana CV-10 y CV-19. De aquí que el  $\bar{\Delta}L$  de sus probetas respectivas a las edades iniciales del ensayo, haya de ser adscrito más al  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de estas últimas que al  $C_3A$  de la fracción cemento portland P-31 que las acompaña. Luego el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de las mismas, debe de ser apreciable, pero estando en mayoría el de la CV-10 sobre el de la CV-19, pese a que el total absoluto de ambas sean prácticamente iguales, 29,63% la CV-10 y 30,09% la CV-19.

Asimismo y como consecuencia de lo anterior, todo lo que sea fijar a las primeras edades del ensayo más  $\text{SO}_3$  del 7,0% inicial, por tener la puzolana un mayor contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , se deberá traducir lógicamente en detrimento anterior y posterior de las disponibilidades del mismo por el  $C_3A$  que le acompaña, y viceversa. Por ello al tener más  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  la puzolana CV-10 que la CV-19, podrá dejar aquella para después, menor cantidad de aquel 7,0% de  $\text{SO}_3$  inicial para el  $C_3A$  de su fracción P-31 que la acompaña, y al contrario con la puzolana CV-19; con lo que las probetas de la primera, CV-10, deberán expandir (y originar mayores valores de RMF, RMC y Porosidad, y menores de  $V_u$  y  $\text{SO}_4^=$ ),

- más por  $\text{ett-rf } 1^{\text{ria}}$  a las edades iniciales del ensayo, y
- menos, por  $\text{ett-lf } 2^{\text{ria}}$ , a las edades siguientes hasta el final del mismo,

y al contrario con las puzolanas CV-19, según lo ocurrido en este trabajo. De aquí que los valores de  $\Delta L$  de sus probetas respectivas a las edades intermedias y finales del ensayo deberán ser más adscribibles a  $\text{ett-lf } 2^{\text{ria}}$ , y quizás también a  $\text{ett-rf } 2^{\text{ria}}$ , residual, en el supuesto posible de que la probable mayor cantidad de  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de ésta, CV-19, sobre aquella CV-10, compitiera también inicialmente en la fijación del 7,0% de  $\text{SO}_3$  (para formar los  $\text{SFCH } 1^{\text{rios}}$  correspondientes)

- con su propia  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  co-participe constitucionalmente con él de la puzolana CV-19, y
- con el  $\text{C}_3\text{A}$  de la fracción P-31 que le acompaña, en detrimento de ambas, parte de las cuales formarían con posterioridad su ettringita respectiva, causa y origen de aquellas expansiones ulteriores producidos, especialmente en las probetas del cemento de mezcla P-31/CV-19 70/30, las cuales podrían llegar a ser incluso bastante rápidas y elevadas en habiendo para entonces cantidad de reaccionantes, (como así ha ocurrido en igual caso en el método de L-A, ver Tabla 24 ),

- $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  y  $\text{C}_3\text{A}$ , en cuyo caso,
  - . la cantidad de  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  acompañante constitucionalmente del primero en la puzolana CV-19 y
  - . la Vf de sus  $\text{SFCH}$  correspondientes habría de ser mayor que la Vf de la  $\text{ett-rf}$  y  $\text{ett-lf}$ , por este orden,

- $\text{C}_3\text{A}$  única y más probablemente, necesarios y suficientes para ello, como así ha debido ocurrir en la torta L-A correspondiente y no en las probetas H-1 respectivas, por mayor porosidad de éstas, sobre aquélla y consiguientemente posible mayor formación de  $\text{ett-Total } 1^{\text{ria}}$  en éstas que en aquéllas, y al contrario con la  $\text{ett-Total } 2^{\text{ria}}$  correspondiente que consiguientemente daría lugar a bastante mayor expansión en aquélla y no en estas, como así ha ocurrido en este trabajo, ver Tabla 41



De la Discusión 2ª : Las cinco columnas de clasificaciones de la Tabla 71, obtenidas, han de ser una vez más, consecuencia lógica de la ya conocida competitividad existente, por el 7,0% de  $\text{SO}_3$  inicial, entre el  $\text{C}_3\text{A}$  y la  $\text{Al}_2\text{O}_3^-$ , a la que se ha hecho referencia, entre otras, en la interpretación anterior. No obstante, y en este caso, para tratar de interpretar y comprender mejor las posibles causas de todo lo acaecido, se va a empezar por las columnas correspondientes a las familias de cementos de mezcla PY-4/Puzolana X y PY-6/Puzolana X, las cuales caen íntegramente dentro del apartado (a) de la interpretación anterior, por lo que ha de aplicárseles el mismo razonamiento allí dado, de aquí que la creación, evolución y desarrollo de las flechas continuas punteadas correspondientes, al cemento portland matriz PY-4 ó PY-6 solos (representativas de la evolución comparativa de los valores del  $\bar{\Delta L}$  de las probetas correspondientes al cemento portland matriz acompañante respectivo P ó PY (\*) respecto a las de sus cementos de mezcla correspondientes), indiquen lógicamente escasez de  $\text{C}_3\text{A}$  en los mismos ó baja, por no decir nula, disponibilidad de  $\text{C}_3\text{A}$ , en este caso durante todo el ensayo, para tratar de alcanzar la máxima acción sinérgica alcanzable posible.

Pues bien, resulta ciertamente paradójico, que cemento portland muy opuesto a ambos anteriores PY-4 y PY-6 en contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , como es el P-2, de 11,09% de  $\text{C}_3\text{A}$ , haya originado, a igualdad de cemento de mezcla y tipo de puzolana y a la edad de 7 días, idéntica creación y evolución de su flecha de puntos correspondiente, como en el caso anterior, viéndose fácilmente superado el  $\bar{\Delta L}$  de sus probetas a tal edad, por prácticamente cualquier puzolana que con él se mezclare; por lo que todo ello es un indicio evidente de que pese a tener dicho cemento portland P-2 tan elevado contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , 11,09%, la disponibilidad del mismo debe ser potencial y relativamente escasa, a la edad de 7 días al menos, pese a lo que por teoría se debiera, aunque no obstante debe ser,

- superior a la de los casos correspondientes a las familias de cementos de mezcla PY-4/Puzolana X y PY-6/Puzolana X, pues en el supuesto falso de que hubieran sido iguales, a igualdad de edad de 7 días, al menos, y de cemento de mezcla , el  $\bar{\Delta L}$  de sus probetas respectivas, hubiesen sido también iguales y de valor, el de las probetas de las familias de estos últimos PY-4/Puzolana X y PY-6/Puzolana X, respectivamente, que no' al contrario; luego al no haber resultado ser iguales tales  $\bar{\Delta L}$  comunes respectivos,

tampoco lo podrán ser las disponibles de  $C_3A$  correspondientes, aunque sí quizás, al menos, semejantes en su minimización respectiva existente entre ellas en ambos casos, P-2/Puzolana X, y PY-4/Puzolana X y PY-6/Puzolana X; de aquí que la similitud existente, a la edad de 7 días, entre las curvas respectivas, y las notables diferencias de valores absolutos de  $\Delta L$  habidas en ambos casos a igualdad de edad y cemento de mezcla, da pie para poder considerar las disponibilidades de  $C_3A$  de los últimos, PY-4/Puzolana X y PY-6/Puzolana X, como muy escasas (prácticamente nulas), para alcanzar en ellos la máxima acción sinérgica, ó similar, e

- inferior, con también apreciable diferencia, a la de los casos correspondientes a los cementos de mezcla de las familias P-1/Puzolana X, pese a que,
  - . por sus contenidos absolutos de  $C_3A$  de sus cementos portland matrices respectivos solos, P-1 (14,11%  $C_3A$ ) y P-2 (11,09%  $C_3A$ ), y
  - . por sobrar en ambos  $C_3A$ , en la estequiometría  $(7,97\% C_3A <> 7,0\% SO_3)$ , de aquí que en el P-1 sobrarían  $14,11\% - 7,97\% = 6,14\% C_3A$  y en el P-2,  $11,09\% - 7,97\% = 3,12\% C_3A$ ; debieran ser teóricamente iguales o al menos muy próximos (lo cual implicaría el supuesto, al parecer erróneo, de la primacía del mecanismo de "through-solution" sobre el tocoquímico con o sin disolución previa, en la formación de la ettringita), y consiguientemente los  $\Delta L$  de sus probetas respectivas al estado solo, también; de aquí que al no haber resultado ser estos últimos así, sino apreciablemente diferentes, con mayoría de los del P-1, ha de ser imputable tal diferencia,
    - . tanto a su mayor contenido de  $C_3A$  (14,11% el P-1, sobre 11,09% el P-2),
    - . como,
      - . a su mayor superficie específica (3192  $cm^2/g$  el P-1 sobre 3015  $cm^2/g$  el P-2),
      - . a su mayor Standard de Cal (99,15 el P-1 sobre 89,13 el P-2, el cual ha resultado ser además el menor de todos los cementos portland P y PY ensayados, véase la Tabla 11),
      - . a su mayor  $CaO$  combinada ó  $CaO_{comb.} = \frac{CaO_{total} - CaO_{libre}}{total - libre}$  (52,04% el P-1 sobre 50,72% el P-2, la cual ha resultado ser además la menor de todos los cementos portland P y PY ensayados, confírmese por cálculo de la Tabla 11),
      - . a su mayor contenido de  $C_2S$  (51,05% el P-1 sobre 33,47% el P-2, el cual ha resultado ser además el menor de todos los cementos portland P y PY ensayados, véase la Tabla 11) y lo contrario de  $C_3S$  (16,46% el P-1 contra 30,26% el P-2, el cual ha resultado ser además el mayor de todos los cementos portland P y PY ensayados, véase la Tabla 11), y
      - . a las ligeramente menores relaciones a/c empleadas en el amasado del mortero de sus respectivas mezclas con la puzolana M (0,58, 0,50 y 0,61, caso del P-1/M 80/20, 70/30 y 50/40, respectivamente, y 0,54, 0,55 y 0,56 caso del P-2/M 80/20, 70/30 y 60/40, respectivamente); ello facilitaría aún más que la  $ett_{total}^{ria}$  de aquellos fuera mayor, quizás, que la de éstos, en perjuicio y beneficio respectivamente de la acción sinérgica derivada correspondiente, la cual, según ello, deberá ser mayor a igualdad de cemento de mezcla en la familia P-2/M que en la P-1/M, como así ha sido el caso,
  - todas ellas con sus consecuencias pertinentes a favor de lo que se trata de demostrar, y consiguientemente y en definitiva a la mayor disponibilidad de  $C_3A$  para dar  $ett_{lf}$  y mayores valores de  $\Delta L$  (extensible lógicamente a todos los casos, sólo 6 de mezcla), de las probetas del P-1, sobre las del P-2, ambos sin puzolana o con ella en su(s) PA ó PUZ correspondientes. Con lo que a igualdad de edad de edad de 7 días, al menos, y cemento de mezcla, en cantidad y tipo de puzolana, debería haber ocurrido, en teoría, otro tanto, y no todo lo contrario, como ha ocurrido en la realidad. Por lo que la causa

que en el primer caso -comparación de ambos P-1 y P-2 sin puzolana, véase Tabla 26-, hizo que el cemento portland P-2 solo, originase menor  $\bar{\Delta}L$  que el P-1, ha tenido que ser la misma que en el segundo caso -comparación de sus cementos de mezcla, PA y PUZ, homónimos respectivos, véase Tabla 55-, ha originado todo lo contrario, con apreciable y muy notable diferencia, con mayoría, claro está y en este caso, de los del cemento portland matriz constituyente P-2; todo lo cual deberá dar por resultado la dificultad de superación del  $\bar{\Delta}L_7$  d. de las probetas del primero, P-1 solo, con algún(os) cemento(s) de mezcla PA y/o PUZ que con él se prepare(n) (de aquí que a los de las puzolanas D, N, y O, u O, D y N, respectivamente, les haya resultado imposible el superarlo, ni a dicha edad de 7 días, ni lógicamente a edad alguna ulterior, pues el 6,05% de  $SO_3$  residual -ver interpretación de la Discusión 2ª de la puzolana M sola así ensayada-, del 7,0% inicial, que quedaría en el caso mas desfavorable, el de la puzolana M, será el suficiente para reaccionar con el  $C_3A$  aún anhidro del mismo, el P-1, para

. alejarse más de aquéllos, y  
. aproximarse y llegar a superar, ya a la edad de 14 días, a los que a la edad de 7 días lo habían logrado superar a él, gracias a la puzolana, en este caso, la A, C y M, respectivamente),  
y todo lo contrario con el P-2 -superación del  $\bar{\Delta}L_7$  d. del mismo sólo, por prácticamente todos o alguno(s) de sus cementos de mezcla PA y PUZ, preparados con cada una de las puzolanas elegidas, D, N, O, A, C y M, y tardanza de respuesta de aquél, 60 días, para superar a los de éstas-, como así ha ocurrido en este trabajo.

Por lo tanto y según todo ello la disponibilidad de  $C_3A$ , al menos a la edad de 7 días, entre todos los cementos de mezcla PA y PUZ de aquél P-1, derivados, deberá considerarse como elevada o excesiva, para conseguir la máxima acción sinérgica, mientras que a la derivada del P-2 a tal edad al menos y en sus homónimos correspondientes, como la apropiada, adecuada e ideal para igual fin notoriamente expansivo, con sus inconvenientes y ventajas correspondientes.

Y como confirmación de que las causas citadas, contenido de  $C_3A$  y superficie específica (grado de finura) especialmente (sin olvidar los contenidos de  $C_3S$  y  $C_2S$  y las relaciones a/c), -tanto más el primero cuanto menor valor posea-, son el origen, junto al contenido del  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana, de la acción sinérgica correspondiente en cada caso, está lo acaecido a las flechas punteadas y fraccionadas, correspondientes a las familias de cementos de mezcla PA y PUZ de cemento portland matriz conformante P-31, cuyo contenido de  $C_3A$ , 7,62%, al ser intermedio entre el del PY-4 ó PY-6 (0,00%) y el del P-1 (14,11%) y/o P-2 (11,09%), deberá originar situaciones y casuísticas de aquellos (P-31/Puzolana X), intermedias a los de éstos (PY-4 ó PY-6/Puzolana X

y P-1 ó P-2/Puzolana X), por lo que,

- en el caso de los cementos de mezcla PA, P-31/Puzolana X 80/20, éstos deberán tender a parecerse, en la forma, a la correspondiente a la del P-1, (pues además la superficie específica de ambos son mas semejantes, P-31,  $3248 \text{ cm}^2/\text{g}$  y P-1,  $3193 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), es decir disponibilidad excesiva para alcanzar la máxima acción sinérgica posible,
- en el caso de los cementos de mezcla PUZ hermanos, P-31/Puzolana X 60/40, a la del P-2, (no por similitud de superficie específica, sino por similitud relativa de cantidad disponible de  $\text{C}_3\text{A}$ , potencialmente escasa), es decir disponibilidad necesaria y suficiente como en tales casos alcanzar la máxima acción sinérgica posible con cualquier puzolana que posea algo de  $\text{Al}_2\text{O}_3^-$  para que se verifique el mismo, y
- en el caso de los cementos de mezcla PUZ hermanos restantes de cada familia, P-31/Puzolana X 70/30, deberán ser intermedios a las de ambos casos anteriores citados.

De aquí que el  $\bar{\Delta}L$  mayor resultante en cada familia a edades iniciales de 7 a 28 días, deba de haber sido el de su cemento de mezcla 60/40 correspondiente, disminuyendo con la adición de cemento portland matriz P-31, como así ha sucedido en este trabajo, debiéndose,

- a) desplazar por lo tanto y hacia la derecha, la evolución de la flecha punteada correspondiente, conforme transcurre el ensayo, y
- b) alcanzar la posición extrema de la derecha, o sea, aquella en la que el  $\bar{\Delta}L$  de las probetas de cemento portland matriz P-31 solo supera al de cualquier cemento de mezcla que con él se preparase por deber de existir por estequiometría,  $7,93\% \text{ C}_3\text{A} \leftrightarrow 7,00\% \text{ SO}_3$ , % de  $\text{SO}_3$  residual del 7,0% inicial, necesario y suficiente para ello, al igual que lo hicieran el P-1 y el P-2 pero debiéndose parecer mas a la de este último, a los 60 días, que a la de aquél, como así también ha sucedido en este trabajo. Y como confirmación de ello está el hecho de que tal posición se alcanza antes, a los 21 ó 28 días de edad, en el caso del cemento de mezcla hermano 80/20.

Todo ello se ha confirmado también mediante el método de ensayo de L-A, (véase interpretación VIII.1.2.2.2.), pero no obstante y aún sin dicha interpretación obtenida mediante el mismo en exclusiva, se puede deducir facilmente como los hechos aquí acaecidos, con este método de ensayo ASTM C 452, discutidos e interpretados, así como

la causa que los han producido, la menor superficie específica principalmente del cemento portland matriz P-2 sobre el resto, son confirmables mediante aquél el L-A; pues lógico es pensar que en el supuesto de que la superficie específica de dicho cemento portland matriz se aumentase mediante molienda, como así se ha hecho cuando se ha ensayado bien sólo o en coyunda con cada una de las puzolanas aquí comparadas, mediante el método L-A, la creación, evolución y desarrollo de las flechas punteadas correspondientes a las familias P-2/Puzolana W, PY-4/Puzolana W y PY-6/Puzolana W a las edades iniciales del ensayo, de las clasificaciones similares a las de la Tabla 24, obtenidas allí mediante el  $\Delta \emptyset$ , no deberán ser ya tan semejantes entre sí como ha ocurrido con el ASTM C 452, o mejor, las del PY-4/Puzolana W y PY-6/Puzolana W si deberán seguir siéndolo, entre sí y respecto a las del ASTM C 452, mientras que la de la familia del P-2/Puzolana W no, ni respecto a las del PY-4/Puzolana W y Puzolana X, ni respecto a las del ASTM C 452, aproximándose por tanto a la de la familia P-1/Puzolana X, como así ha ocurrido en este trabajo, véase Tabla 24, donde se puede observar claramente como a dicha flecha hipotética correspondiente al P-2 sólo (en dicha Tabla 24 se ha omitido por no considerarse ya necesario) le ocurre lo dicho. Ello viene a confirmar además que el grado de influencia en la acción sinérgica a producir en el método ASTM C 452, de los contenidos de  $C_3S$  y  $C_2S$ ,  $CaO_{comb.}$  y Standard de Cal, del cemento portland acompañante no son tan determinantes como el contenido de  $C_3A$  y la superficie específica de aquél, aunque sí en cambio son bastante coadyuvantes.

(Al hilo de esta parte de la interpretación, se ha de manifestar antes de continuar adelante que tanto los hechos citados como la causa que los producen, en su caso, no se han podido confirmar tan nítidamente mediante el método H-1, puesto que por las razones vistas en su momento, con el mismo no se han realizado similares estudios comparativos).

Por otra parte, y como consecuencia de lo dicho en la primera interpretación (a) ii), en las familias de cementos de mezcla PY-4/Puzolana X y PY-6/Puzolana X, en las que existe poca o nula (posible y mayoritariamente en los 70/30 y 60/40 correspondientes) competitividad entre el  $C_3A$  y el  $Al_2O_3^{r-}$  por la fijación del 7,0% de  $SO_3$  inicial, a mayor contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  del cemento de mezcla PA y/o PUZ correspondiente(s),

- bien por adiciones diferentes (en cantidad), cada vez mayores, de una misma puzolana X que la posea (o sea, en el caso comparativo de "a igualdad de familia de cementos de mezcla PA y PUZ"),
- bien por adiciones iguales (en cantidad) individualizadas, de distintas puzolanas X de contenidos diferentes de  $Al_2O_3^{r-}$  (o sea, es el caso comparativo de "a igualdad de cementos de mezcla PA ó PUZ"),

mayor  $\Delta L$  se deberá de originar en él a la edad de 7 días, al menos y consiguientemente mayor deberá ser su  $\Delta L$  provocado en la probeta respectiva por la puzolana correspondiente; por lo que en ambos casos, éste, el  $\Delta L$ , ha de ser un fiel reflejo de aquél, el contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana, y viceversa. Ello permitirá pues, el poder compararlos y clasificarlos en función del mismo,  $\Delta L$ , de menor a mayor por este orden, obtenido a igualdad de edad, cemento de mezcla y agua de amasado, no debiendo de extrañar por tanto la probable coincidencia total ó parcial de las clasificaciones que así se obtuvieren, con aquellas otras obtenidas de iguales cementos de mezcla cuyo cemento portland matriz constitutivo es o puede ser de mediano ó elevado contenido de  $C_3A$ , véase Tabla 71, que han sido de coincidencia parcial, es decir, de mayor coincidencia entre la  $A < C < M$  por este orden, y menor coincidencia, entre el resto  $D < N < O$ , ó  $D < O < N$ , ó  $N < D < O$ , ó  $N < O < D$ , ...etc, pues básicamente, ambas coincidentes, total o parcialmente, obtenidas, se fundamentan en una misma causa, como es la de minimizar lo mas posible, y al menos a la edad de 7 días, la disponibilidad de  $C_3A$  en el medio,

- bien porque el cemento portland matriz constituyente respectivo sea de contenido muy escaso o prácticamente nulo de  $C_3A$ , ó
- bien porque dicho cemento portland matriz constituyente respectivo, pese a ser de mediano o elevado contenido de  $C_3A$ , esté groseramente molido para así aportarlo escasamente, y tanto mas groseramente molido cuanto mayor sea su contenido de  $C_3A$  y viceversa,

al objeto de que la competitividad del mismo respecto del  $Al_2O_3^{r-}$ , en la fijación del 7,0% de  $SO_3$  inicial, sea, a tal edad inicial al menos, la menor posible, siendo lo ideal su nulidad, para que de este modo la puzolana en cuestión y mas concretamente su  $Al_2O_3^{r-}$ , que como se sabe desde la POP forma ettringita a mayor velocidad que el  $C_3A$ , o lo que es lo mismo, fija  $SO_3$  para dicho fin a mayor velocidad que el  $C_3A$ , monopolice lo mas posible, durante al menos los 7 primeros días del ensayo, el uso y consumo del mismo, exteriorizando de este modo con prontitud su carácter, mediante el valor del  $\Delta L$  provocado en exclusiva por la misma, en sus probetas respectivas, y tanto mas en exclusiva cuanto menor sea la cantidad de  $C_3A$  de la fracción de cemento portland que la acompañe, esté o no, groseramente molido, y viceversa, como así ha ocurrido en este trabajo en los casos anteriores de cementos de mezcla citados, (y/o también mediante el valor de la RMF y/o RMC correspondiente(s).)

No obstante y en general, se ha de reconocer que las clasificaciones derivadas de cementos de mezcla, en especial 70/30 y 60/40, de cemento portland matriz acompañante de nulo contenido de  $C_3A$ , caso del PY-4 y PY-6 empleados, han resultado ser, como debían según todo lo anterior, mas precisas, dada su coincidencia total con las correspondientes obtenidas

- del A. Q.,
- del ensayo de Fratini,
- de la POP, y
- del L-A,

a través de los cuales fueron igualmente ensayadas, estudiadas y comparadas.

Todo lo cual da pie para poder deducir el lugar que deberían ocupar las puzolanas CV-10 y CV-19 en la clasificación dada anterior  $D < N < O < A < C < M$ , mediante el valor del  $\bar{\Delta}L_7$  días, correspondiente al cemento de mezcla PUZ 70/30 P-31/CV-10 ó CV-19 respectivo, según el cual ambas quedarían situadas del siguiente modo  $D < N < O < CV-19 < C < CV-10 < M$ , deduciéndose por tanto de la misma su contenido mas probable de  $Al_2O_3^{r-}$ , respecto del de las demás, el cual coincide también con el obtenido a través del ensayo L-A.

Y finalmente se deberá tener en cuenta además la interpretación correspondiente a la Discusión 5ª del estudio comparativo realizado a las puzolanas D, O, A, C y M a través del método de L-A, mediante la cual se confirmó la posibilidad real de poder clasificar a las puzolanas estudiadas y comparadas, merced al valor del  $\Delta\theta$  a edades iniciales de su torta respectiva, y una vez clasificadas poder conocer el contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  relativo probable de una de ellas respecto al de las demás. Y lógicamente mediante igual tipo de cementos PY-4 ó PY-6.

Pues bien, en este caso se podrá realizar otro tanto con los valores del  $\bar{\Delta}L$  inicial (no mas de la edad de 28 días) correspondientes a sus probetas respectivas.

De la Discusión 3ª: Ello debe ser una confirmación adicional de que según las clasificaciones obtenidas al final de la interpretación anterior de las puzolanas comparadas, los contenidos probables de  $Al_2O_3^{r-}$  de las puzolanas A, C, CV-10 y M, deben de estar mas próximos entre si que con los del resto, D, N, O y CV-19 y viceversa. Por lo tanto ambas agrupaciones deberán de originar entre si una proximidad relativa entre las puzolanas O, CV-19 y A, con lo que según este método de ensayo, todas ellas podrán quedar reagrupadas en tres subgrupos

- subgrupo A: formado por las puzolanas D y N,
- subgrupo B: formado por las puzolanas O, CV-19 y A, y
- subgrupo C: formado por las puzolanas C, CV-10 y M

los cuales coinciden prácticamente con las agrupaciones apriorísticas establecidas para su estudio mediante el ensayo, de Fratini, POP y L-A.

Por otra parte y respecto al parámetro  $V_{cl}$ , se confirma una vez más y mediante este ensayo ASTM C 452, al igual que ocurriere con el L-A, que la causa debe ser adscrita al contenido probable respectivo de  $Al_2O_3^r$  de cada puzolana y su competitividad con el  $C_3A$  en la fijación del 7,0% de  $SO_3$  en este caso. Todo lo cual conduce a confirmar el relativo parentesco o proximidad entre las mismas dicho anteriormente, con la apreciable distinción de que las impurezas de la puzolana N, pese a su relativa gran lejanía de la M, han de poseer algo de  $Al_2O_3^r$  del mismo ó de muy parecido tipo a la de esta última.

Por otra parte lo acaecido a la edad de 14 días, referente a la consecución, en cantidad y tiempo, - en tan sólo 7 días, los que van de la edad de 7 días a la edad de 14 días -, de valores de  $V_{cl}$  bastante menores en todos los casos en los que la puzolana M estuvo presente, a cuando lo estuvo la D, unido al más que procable mayor contenido de  $Al_2O_3^r$  de aquella sobre el resto, da pié para pensar que tan rápida y notable disminución de la  $V_{cl}$  en todos los casos ha de ser adscribible a dicho mayor contenido de  $Al_2O_3^r$  de aquella sobre ésta, habiendo de ser por tanto los mismos en cada caso un fiel reflejo del contenido probable de  $Al_2O_3^r$  de su puzolana correspondiente, el cual se podrá manifestar más claramente aún si cabe, si el cemento portland matriz acompañante es de contenido prácticamente nulo de  $C_3A$ , caso del PY-4 ó PY-6, como así también ha ocurrido en este trabajo.

De la Discusión 4ª : Probablemente ello sea debido a que en este caso pudieran producirse los mayores y mejores condicionantes necesarios para originarse ett- $r_f$  <sup>1- $r_{ia}$</sup>  con mayor rapidez que con el resto de las puzolanas, pudiendo llegar a originarse quizás sin que el sistema haya fraguado en su totalidad, siendo por tanto el mismo, acomodaticio a las rápidas expansiones que tan temprana y rápidamente se desarrollan en su seno.

Tales mejores condicionantes pueden muy bien venir propiciados:

- a) por una parte, porque al no ser el metacaolín un "vidrio" propiamente dicho, y si un estado pseudo-cristalino, su velocidad de



formación de nuevos compuestos cristalinos en un medio portlandfítico y selenitoso adecuados, podrá quizás ser mayor que la de un vidrio propiamente dicho, el cual exigiría un ataque con disolución previos por parte de la portlandita antes de la formación y precipitación de aquellos, y

- b) por otra, porque al disponer su cemento portland matriz acompañante PY-6 de mayor contenido de  $C_3S$ , el pH > 10,8 necesario en el medio para que se verifiquen tales reacciones expansivas, se alcanzará con mayor rapidez.

Todo lo cual se podría traducir en un menor valor del  $\bar{d}L$  y  $Vcl$  correspondientes como así ha ocurrido en este trabajo, con la puzolana M y el cemento PY-6.

Interpretación VIII.2.2.2.7 (F):

De la Conclusión 2ª : Observando la evolución de las flechas continuas punteadas en las clasificaciones obtenidas se puede ver que las mismas correspondientes a las familias del PY-4 y PY-6,

- en RMF tienden a desplazarse suavemente en mayor o menor grado hacia la izquierda, mientras que
- en RMC ocurre otro tanto más o menos sinuosa y acusadamente, lo cual parece querer indicar la mayor participación de la puzolana aluminica M y aluminosilícicas C y A por este orden, conforme transcurre el ensayo en la consecución de los valores de tales parámetros respectivos.

Por lo tanto lo realmente destacable de ello es que a la edad del ensayo de 7 días, en la consecución de los valores más elevados de tales parámetros de todos los cementos P y PY, y de mezcla ensayados, participan principalmente,

- la hidraulicidad de la fracción cemento portland matriz acompañante respectivo, y
- la hidraulicidad del carácter fundamentalmente aluminico de la puzolana que lo posea, y a más aluminico mejor aún, pues es sintomático

- . que los valores de  $RMC_{7d}$  y  $RMC_{7d}$  de los cementos P y PY solos hayan sido superados por lo general y únicamente por los de los cementos de mezcla de la puzolana M, y sólo en contada(s) ocasion(es) por los del resto de las puzolanas en especial la C, CV-10, A, ... etc., y
- . que dicho proceso de superación de los de aquellos P y PY solos por los cementos de mezcla del resto de las puzolanas, conforme

transcurría el ensayo y mas alumínica que silfíca era(n) la(s) misma(s).

Por otra parte la relativa similitud entre las flechas punteadas

- de las familias del PY-4 y PY-6, con las de RMF de las del P-2 por un lado, y

- de las familias del P-1 y P-31, por otro

parece querer confirmar una vez más la influencia notable del grado de superficie específica del cemento portland matriz acompañante respectivo para la aportación de la cantidad de  $C_3A$  precisa para la consecución de la máxima acción sinérgica expansiva  $\bar{\Delta}L$  y máxima por tanto de RM en cada caso, como ya se refiriera en la interpretación anterior VIII.2.2.2.7 (E) 2ª mediante los parámetros  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$ ; de aquí que gracias a ello,

- la flecha punteada de los valores de RMF (parámetro de mayor sensibilidad en RS que el de RMC) de las familias del P-2 está desplazada a las edades iniciales del ensayo, un lugar a la izquierda respecto a la homónima del PY-4 y PY-6, y

- los valores de  $RMC_{7d}$  de las familias del P-2 han superado notablemente a los del P-2 solo, a dicha edad, no habiendo ocurrido lo mismo por todo lo contrario con los correspondientes a las del P-1 y P-31 respectivamente, dado que la supf.esp. de estos últimos es mucho mayor que la de aquél P-2, véase Tabla 11 (A.Q.)

Por todo lo cual la máxima acción sinérgica expansiva  $\bar{\Delta}L_{7d}$  y máxima de  $RM_{7d}$  deberá originar por lo general en tal caso de las familias del P-2 un valor de  $Vu_{7d}$  superior al de dicho P-2 solo, como así ha ocurrido en este trabajo.

Interpretación VIII.2.2.2.7 (H) :

La evolución de las flechas punteadas, véase Tablas 71 y 72, confirma en todos los casos que a más puzolana añadida mayor porosidad provocada, como ha ocurrido en este trabajo, por la posible razón apuntada en la interpretación VIII.2.2.2.3. (E) (F), 2ª.

Finalmente y para el compendio global de esta interpretación VIII.2.2.2.7. cabe citar aquí los párrafos finales afines correspondientes al compendio global de la interpretación VIII.1.2.2.3 (L-A).

### TABLA 71

CLASIFICACION DE LAS PUZOLANAS D,N,O,A,C,M,CV-10 y CV-19, COMPARADAS ENTRE SI Y RESPECTO DE SU CEMENTO PORTLAND MATRIZ ACOMPAÑANTE RESPECTIVO, P ó PY, SOLO, EN 1(ΔL/W), DE MENOR A MAYOR VALOR

EDAD (DÍAS)	PARAMETRO	CÓDIGO DE MEDIDA	CEMENTO PORTLAND MATRIZ ACOMPAÑANTE RESPECTIVO:				
			P-1matr.11% cpl	P-2matr.08% cpl	P-31matr.04% cpl	PY-4matr.06% cpl	PY-6matr.06% cpl
MAS PUZOLANA:							
7	90/20	N-D-O-C-A-M-A	N-D-O-C-A-M-A	D-A-O-C-A-M-A	C-A-O-C-A-M-A	C-A-O-C-A-M-A	N-D-O-C-A-M-A
7	90/30	O-D-O-C-A-M-A	O-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
	60/40	O-D-N-M-C-A	D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
14	90/20	N-M-C-D-O-A	N-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
14	90/30	N-C-M-D-O-A	N-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
14	60/40	O-D-N-M-C-A	N-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
21	90/20	N-D-O-C-O-M-A	N-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
21	90/30	N-D-O-C-A-M-A	N-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
21	60/40	N-D-O-C-A-M-A	N-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
28	90/20	N-M-C-D-O-A	N-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
28	90/30	N-C-M-D-O-A	N-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
28	60/40	N-D-O-C-O-A	N-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
60	90/20	N-C-D-O-M-A	N-C-D-O-M-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
60	90/30	N-C-D-O-M-A	N-C-D-O-M-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
60	60/40	N-D-O-C-A-M-A	N-D-O-C-A-M-A	D-O-C-A-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
90	90/20	N-C-M-D-O-A	N-C-M-D-O-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
90	90/30	N-C-D-O-M-A	N-C-D-O-M-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
90	60/40	N-C-D-O-M-A	N-C-D-O-M-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
565	90/20	M-C-N-O-A-D	N-C-M-D-O-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
565	90/30	N-C-M-D-O-A	N-C-M-D-O-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
565	60/40	N-C-M-D-O-A	N-C-M-D-O-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
730	90/20	M-C-N-O-A-D	N-C-M-D-O-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
730	90/30	N-C-M-D-O-A	N-C-M-D-O-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A
730	60/40	N-C-M-D-O-A	N-C-M-D-O-A	D-N-C-A-O-M-A	(CV-19) - (CV-10)	(CV-19) - (CV-10)	N-D-O-C-A-M-A

NOTAS:

A-7 Días, 90/20, el P-1 y el PY-6 son iguales. P-2 y el PY-6 son iguales. P-3 y el PY-6 son iguales. P-4 y el PY-6 son iguales. P-5 y el PY-6 son iguales. P-6 y el PY-6 son iguales. P-7 y el PY-6 son iguales. P-8 y el PY-6 son iguales. P-9 y el PY-6 son iguales. P-10 y el PY-6 son iguales. P-11 y el PY-6 son iguales. P-12 y el PY-6 son iguales. P-13 y el PY-6 son iguales. P-14 y el PY-6 son iguales. P-15 y el PY-6 son iguales. P-16 y el PY-6 son iguales. P-17 y el PY-6 son iguales. P-18 y el PY-6 son iguales. P-19 y el PY-6 son iguales. P-20 y el PY-6 son iguales. P-21 y el PY-6 son iguales. P-22 y el PY-6 son iguales. P-23 y el PY-6 son iguales. P-24 y el PY-6 son iguales. P-25 y el PY-6 son iguales. P-26 y el PY-6 son iguales. P-27 y el PY-6 son iguales. P-28 y el PY-6 son iguales. P-29 y el PY-6 son iguales. P-30 y el PY-6 son iguales. P-31 y el PY-6 son iguales. P-32 y el PY-6 son iguales. P-33 y el PY-6 son iguales. P-34 y el PY-6 son iguales. P-35 y el PY-6 son iguales. P-36 y el PY-6 son iguales. P-37 y el PY-6 son iguales. P-38 y el PY-6 son iguales. P-39 y el PY-6 son iguales. P-40 y el PY-6 son iguales. P-41 y el PY-6 son iguales. P-42 y el PY-6 son iguales. P-43 y el PY-6 son iguales. P-44 y el PY-6 son iguales. P-45 y el PY-6 son iguales. P-46 y el PY-6 son iguales. P-47 y el PY-6 son iguales. P-48 y el PY-6 son iguales. P-49 y el PY-6 son iguales. P-50 y el PY-6 son iguales. P-51 y el PY-6 son iguales. P-52 y el PY-6 son iguales. P-53 y el PY-6 son iguales. P-54 y el PY-6 son iguales. P-55 y el PY-6 son iguales. P-56 y el PY-6 son iguales. P-57 y el PY-6 son iguales. P-58 y el PY-6 son iguales. P-59 y el PY-6 son iguales. P-60 y el PY-6 son iguales. P-61 y el PY-6 son iguales. P-62 y el PY-6 son iguales. P-63 y el PY-6 son iguales. P-64 y el PY-6 son iguales. P-65 y el PY-6 son iguales. P-66 y el PY-6 son iguales. P-67 y el PY-6 son iguales. P-68 y el PY-6 son iguales. P-69 y el PY-6 son iguales. P-70 y el PY-6 son iguales. P-71 y el PY-6 son iguales. P-72 y el PY-6 son iguales. P-73 y el PY-6 son iguales. P-74 y el PY-6 son iguales. P-75 y el PY-6 son iguales. P-76 y el PY-6 son iguales. P-77 y el PY-6 son iguales. P-78 y el PY-6 son iguales. P-79 y el PY-6 son iguales. P-80 y el PY-6 son iguales. P-81 y el PY-6 son iguales. P-82 y el PY-6 son iguales. P-83 y el PY-6 son iguales. P-84 y el PY-6 son iguales. P-85 y el PY-6 son iguales. P-86 y el PY-6 son iguales. P-87 y el PY-6 son iguales. P-88 y el PY-6 son iguales. P-89 y el PY-6 son iguales. P-90 y el PY-6 son iguales. P-91 y el PY-6 son iguales. P-92 y el PY-6 son iguales. P-93 y el PY-6 son iguales. P-94 y el PY-6 son iguales. P-95 y el PY-6 son iguales. P-96 y el PY-6 son iguales. P-97 y el PY-6 son iguales. P-98 y el PY-6 son iguales. P-99 y el PY-6 son iguales. P-100 y el PY-6 son iguales. P-101 y el PY-6 son iguales. P-102 y el PY-6 son iguales. P-103 y el PY-6 son iguales. P-104 y el PY-6 son iguales. P-105 y el PY-6 son iguales. P-106 y el PY-6 son iguales. P-107 y el PY-6 son iguales. P-

**TABLA 72**

CLASIFICACION DE LAS PUZOLANAS UNO A 5,7M COMPARADAS ENTRE SI Y RESPECTO DE SU CEMENTO PORTLAND MATRIZ ACOM-  
PAÑANTE RESPECTIVO Pópy(s) SOLO EN ((RMF/RMC:(kg/cm<sup>2</sup>)), DE MENOR A MAYOR VALOR. **ASTM C 452-68**

[illegible]

VIII.2.2.2.9.- Ejemplos Prácticos de los Ocho Cementos Pozolánicos Industriales elegidos al azar para la realización de este trabajo, y ensayados según el método ASTM C 452-68

Los resultados experimentales obtenidos se encuentran en la Tabla 73.

Vale aquí íntegramente lo correspondiente al apartado VIII. 1.2.2.5.

Discusión e Interpretación VIII.2.2.2.9.

1ª.- Los ocho cementos de mezcla PUZ industriales así ensayados, han resultado ser de baja o escasa RS (100%), puesto que el  $\overline{\Delta L}_{28d} > 0,073\%$  (ver párrafo final de la interpretación VIII.2.2.1 y su Tabla 31 resultante). No obstante y pese a todo lo cual el grado de baja o escasa RS de cada uno de ellos ha resultado ser en ocasiones bastante diferente del resto.

Y la causa más probable de la no coincidencia total de clasificaciones obtenidas de los ocho cementos PUZ industriales en función de su,

- contenido de  $Al_2O_3$  (%) parcial, según RC-75 (1), respectivo,
- ensayo de Fratini ( (CaO) en la fase líquida)
- ensayo L-A ( $\Delta \emptyset_{28d}$ ),
- ensayo ASTM C 452-68 ( $\overline{\Delta L}_{14}$  y 28 días), y
- ensayo HIBRIDO-1 ( $\overline{\Delta L}_{14}$ , 28 y 90 días)

ha de ser debida a que en el caso del subgrupo formado por los cementos PUZ-8, PUZ-6, PUZ-4 y PUZ-5, sus fracciones puzolánicas constitutivas respectivas han de poseer mayor cantidad de  $Al_2O_3$  que las correspondientes a las de los cementos PUZ-3, PUZ-2, PUZ-7 y PUZ-1 del otro subgrupo, y viceversa, con el contenido de  $C_3A$ , aunque los cementos PUZ-8 y PUZ-5, ambos de aquél subgrupo también deben de tener algo elevado este otro contenido.

2ª.- Las clasificaciones obtenidas de los ocho cementos de mezcla PUZ industriales anteriores así ensayados (ASTM C 452-68), en función del parámetro,

- $\Delta L$  (%), alcanzado por sus probetas respectivas a las edades fundamentales del ensayo de 14 y 28 días.
  - contenido porcentual ponderal total y parcial, véase Tabla 11, respectivo,
  - módulo de fundentes,  $Al_2O_3$  (%) /  $Fe_2O_3$  (%), y
  - contenido de  $CaO$  (M/H) correspondiente a la fase líquida del ensayo de Frattini, véase Fig. 4, respectivo.
- se encuentran en la Tabla 74, junto con las correspondientes apropiadas, derivadas del ensayo L-A e Híbrido-1, respectivamente

Tabla 74

Edad (días)	Método de ensayo	Indicador	Correlación de las clasificaciones obtenidas, en función de distintos parámetros de mayor a menor valor por este orden, de los ocho cementos PUZ industriales, véase Tabla 11, ensayados según el AQ, Frattini, método de L-A, ASTM C 452-68 e H-1, respectivamente.	Cemento PUZ industrial que resultaría resultó ser:	
				Menor AS, (y siguiente)	Mayor AS, (y siguiente)
	AQ	$Al_2O_3$ total (%)	PUZ-4 > PUZ-6 > PUZ-8 > PUZ-3 > PUZ-5 > PUZ-2 > PUZ-7 > PUZ-1	PUZ-4 > PUZ-5	PUZ-7 > PUZ-1
		$Al_2O_3$ parcial (%)	PUZ-6 > PUZ-4 > PUZ-8 > PUZ-5 > PUZ-3 > PUZ-7 > PUZ-1	PUZ-6 > PUZ-5	PUZ-7 > PUZ-1
		IF	PUZ-4 > PUZ-3 > PUZ-6 > PUZ-2 > PUZ-5 > PUZ-7 > PUZ-8 > PUZ-1	PUZ-4 > PUZ-3	PUZ-6 > PUZ-1
7	Frattini	Relación de $CaO$ (M/H)	PUZ-4 > PUZ-5 > PUZ-6 > PUZ-3 > PUZ-2 > PUZ-7 > PUZ-1	PUZ-4 > PUZ-7	PUZ-5 > PUZ-6
28-90-130	L-A	AS (%)	PUZ-5 > PUZ-6 > PUZ-1 > PUZ-2 > PUZ-3 > PUZ-4 > PUZ-7 > PUZ-8	PUZ-5 > PUZ-6	PUZ-4 > PUZ-7
14-28-90-130	ASTM C 452-68	$\Delta L$ (%)	PUZ-5 > PUZ-6 > PUZ-8 > PUZ-4 > PUZ-7 > PUZ-3 > PUZ-2 > PUZ-1 PUZ-5 > PUZ-6 > PUZ-8 > PUZ-4 > PUZ-7 > PUZ-3 > PUZ-2 > PUZ-1 PUZ-5 > PUZ-6 > PUZ-8 > PUZ-4 > PUZ-7 > PUZ-3 > PUZ-2 > PUZ-1 PUZ-5 > PUZ-6 > PUZ-8 > PUZ-4 > PUZ-7 > PUZ-3 > PUZ-2 > PUZ-1	PUZ-5 > PUZ-6 PUZ-5 > PUZ-6 PUZ-5 > PUZ-6 PUZ-5 > PUZ-6	PUZ-2 > PUZ-1 PUZ-3 > PUZ-1 PUZ-3 > PUZ-7 PUZ-8 > PUZ-7
14-28-90-130	H-1	$\Delta L$ (%)	(PUZ-5) > (PUZ-6) > (PUZ-8) > (PUZ-4) > (PUZ-7) > (PUZ-3) > (PUZ-2) > (PUZ-1) (PUZ-5) > (PUZ-6) > (PUZ-8) > (PUZ-4) > (PUZ-7) > (PUZ-3) > (PUZ-2) > (PUZ-1) (PUZ-5) > (PUZ-6) > (PUZ-8) > (PUZ-4) > (PUZ-7) > (PUZ-3) > (PUZ-2) > (PUZ-1) (PUZ-5) > (PUZ-6) > (PUZ-8) > (PUZ-4) > (PUZ-7) > (PUZ-3) > (PUZ-2) > (PUZ-1)	(PUZ-5) > (PUZ-6) (PUZ-5) > (PUZ-6) (PUZ-5) > (PUZ-6) (PUZ-5) > (PUZ-6)	(PUZ-3) > (PUZ-1) (PUZ-3) > (PUZ-1) (PUZ-7) > (PUZ-1) (PUZ-8) > (PUZ-7)

Como se puede observar, de todas ellas las mas coincidentes han resultado ser,

- en un caso, las derivadas,
- . del contenido porcentual ponderal de  $Al_2O_3$  parcial (AQ según RC-75),
- . del método de ensayo de Frattini,
- . del método de ensayo ASTM C 452-68, a las edades de 14 y 28 días, y
- . del método de ensayo H-1 a las edades de 14, 28 y 90 días, pues según las mismas y la flecha divisoria trazada en medio de las 14 clasificaciones obtenidas, los cementos PUZ-8, PUZ-6

PUZ-4 y PUZ-5 forman entre si y por proximidad de sus valores, un sub-grupo distinto del formado por el PUZ-3, PUZ-2, PUZ-7 y PUZ-1, cuyos componentes de cada sub-grupo se encuentran intercambiados de lugar según la clasificación que se considere, y

- en otro caso, las derivadas
    - . del método de ensayo de L-A a 730 días,
    - . " " " " " ASTM C 452-68 a la edad de 730 días
- pues al igual que en el caso anterior los cementos PUZ-6, PUZ-5, PUZ-1 y PUZ-2 forman un subgrupo aparte de los cementos PUZ-3, PUZ-8, PUZ-4 y PUZ-7, habiendo un cierto intercambio entre los subgrupos componentes de ambos casos.

3\*.- Según la conclusión VII.4.2,10\* (POP), y los subgrupos obtenidos de las clasificaciones anteriores se puede decir con fundamento que en gran medida los cementos PUZ-8, PUZ-6, PUZ-4 y PUZ-5, deberán de ser, de entre los ocho ensayados y comparados, aquellos cuyas fracciones puzolánicas constitutivas respectivas posean mayor cantidad de  $Al_2O_3^r$ , por ese orden de mayor a menor, las cuales serían las causantes,

- de su mayor fijación de CaO de la fase líquida del ensayo de Fratini, y

- de su mayor  $\bar{\Delta}L_{14}$  y 28 d. (%) proporcionado en los métodos de ensayo ASTM C 452-68 e H-1,

y viceversa, el resto de los cementos puzolánicos, o sea, el PUZ-3, PUZ-2, PUZ-7 y PUZ-1; debiendo ocurrir todo lo contrario, respecto al contenido de  $C_3A$  de su fracción cemento portland matriz constitutivo respectivo, causa por la cual, estos últimos, por lo general, acabarían aventajando en  $\bar{\Delta}L$  con posterioridad a alguno de aquellos, en este caso el PUZ-4. Por lo que de todo ello se deduce que los cementos PUZ-5, PUZ-6, PUZ-2, PUZ-1 y PUZ-8, deberían poseer además un apreciable contenido de  $C_3A$  de su fracción cemento portland matriz constitutivo respectivo, no así el PUZ-3, PUZ-4 y PUZ-7 respectivamente.

4\*.- En este caso y mediante los métodos de ensayo ASTM C 452-68 e H-1, indistintamente, el mensaje proporcionado por el simple análisis químico de un cemento puzolánico es algo mas que un levísimo indicio, pues si en el mismo el contenido de  $Al_2O_3$  resultare elevado (>7,5%) presumiblemente,

- el ensayo de Fratini lo debería cumplir con holgura a la edad de 7 días, y de igual modo el de RMC y RMF correspondiente (1),
  - en el ensayo ASTM C 452-68 e H-1,
    - . el cemento de mezcla PUZ en cuestión, debería sobrepasar el valor del 0,054% y 0,044%, respectivamente, a 28 días.
    - (. aumentando el valor del  $\bar{A}L_{7,14}$  y/o 28d. (%) con la adición de puzolana, en caso de que la misma se conociere de antemano),
- es decir, en tales casos, la(s) puzolana(s) constitutivas bien podrían parecerse a la C y/o CV-10 y/o M empleadas para la realización de este trabajo.

No obstante y en cualquier caso como el anterior, o totalmente contrario, habrá de serle confirmado, antes de su puesta en obra, su grado de RS mediante alguno(s) de los métodos adecuados indicados en el Cap. XII. Aplicaciones.

- 5\*.- En este método de ensayo las clasificaciones obtenidas a las edades iniciales de 28 a 90 días y final de 730 días, de los ocho cementos PUZ industriales en función del valor del  $\bar{A}L(\%)$  de sus probetas respectivas, han resultado ser entre si medianamente coincidentes, a diferencia de lo ocurrido en igual caso,
- con el método L-A, aplicado a dichos cementos PUZ industriales, ya visto,
  - con el método H-1, aplicado a dichos cementos PUZ industriales, que se verá mas adelante.

Pero ello es lógico por la razón dada en la interpretación VIII.2.2.2.7,1\*(E), o sea, falta de  $SO_3$  para "satisfacer todas las necesidades del mismo" por parte de sus fracciones componentes, portland y puzolana(s).

- 6\*.- Vale aquí íntegramente la Discusión e interpretación VIII.3.3.2.3.8, 6\* (H-1).

- 7\*.- Los ocho cementos puzolánicos industriales han mostrado una gran heterogeneidad de comportamiento al ser ensayados mediante el método ASTM C 452-68, teniendo únicamente de común la misma el que según la propuesta de especificación realizada a raíz de la interpretación VIII.2.2.2.7, ninguno de los ocho cementos

puzolánicos industriales así ensayados, ha resultado ser de elevada o moderada resistencia al ataque de los iones sulfato, puesto que el valor del  $\bar{\Delta L}_{28d.}$  (%) de sus probetas respectivas, a la edad de 28 días de las mismas, ha sido siempre, y en todos los casos mayor, del 0,0054% ó 0,073%, respectivamente.

Ello no resulta concordante con igual caso correspondiente al método de ensayo de L-A, y si en cambio resultará concordante, como se verá con igual caso correspondiente al método de ensayo H-1. No obstante y pese a todo lo cual, los tres métodos de ensayo citados concuerdan en lo fundamental como es el no calificar a NINGUNO de los cementos PUZ industriales citados de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, en general, y de calcio (yeso), en particular".

9<sup>a</sup>.- En este caso, el valor de la relación  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$ , osciló entre 0,51 y 0,55, por lo que puede ser considerada como normal.

9<sup>b</sup>.- Finalmente véase el párrafo final correspondiente a la interpretación VIII.1.2.2.4 (L-A)



VIII.3.- Estudio del Comportamiento Frente al Ataque de los Iones Sulfato de los Cementos P, PY, PA, PUZ y PUZ, Seleccionados y Preparados para este Trabajo, Mediante el Método Acelerado de Ensayo HIBRIDO-1.

VIII.3.1.- Razones de la hibridación de los métodos acelerados de ensayo L-A y ASTM C 452.

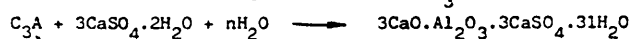
Las razones de la hibridación de los métodos acelerados de ensayo L-A y ASTM C 452, fueron las siguientes:

- 1.- Por las conclusiones obtenidas en un trabajo explorativo previo realizado como becario bajo el patrocinio de la Fundación "Juan March" (290), las cuales confirman la destrucción total de la probeta de mortero ASTM C 452-68 en el caso de que la misma tuviera en su mezcla-conglomerante cemento mas yeso, un 14% ó un 21% de  $SO_3$  respectivamente.
- 2.- Por la conclusión VII.4.2, 8ª (PCP).
- 3.- Por las múltiples razones surgidas de todo lo hasta ahora realizado y en especial las derivadas de los cementos de mezcla PA y PUZ los cuales y como es sabido están siendo llamados para sustituir a los portland en la práctica real de la preparación de hormigones y que en general abogan por la necesidad de un método acelerado de ensayo que posea un mayor contenido de yeso como agresivo y que sea mas ágil y fácil de manejo que el L-A.
- 4.- Por las diferencias habidas en su grado de agresividad, es decir, en su distinta cuantía en la dosificación del yeso puesto en ambos como agresivo, las cuales se pueden cuantificar razonadamente del siguiente modo:

Dado que por estequiometría (142)(193)(251) y (252), para originar la total transformación del  $C_3A$  y/o  $Al_2O_3$ , en ett-lf y ett-rf respectivamente, sería necesario que por cada molécula gramo de los dos primeros, existieran tres moléculas gramo de  $-CaSO_4 \cdot 2H_2O$  equivalentes aproximadamente a 1,4 moléculas-gramo de  $SO_3$  y al tener lugar la reacción de ambos a un mismo tiempo por encontrarse formando parte de un cemento de mezcla PA, 80/20, ó PUZ, 70/30 ó 60/40, al que se le adiciona tal agresivo en cantidades apreciables, se necesitarían al menos las siguientes cantidades de  $SO_3$  para un caso de entre los mas desfavorables o extremos posibles, y próximo a los que han aparecido en este trabajo, como puede ser

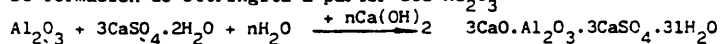
el de los cementos de mezcla citados formados con un cemento portland, P, del 15% de  $C_3A$  y una puzolana M "pura", cuyo contenido máximo posible de  $Al_2O_3^r$  es como se sabe 2,08%. Pues bien las reacciones que tendrían lugar serían:

a) De formación de ettringita a partir de  $C_3A$



Pm: 270,20 516,52 = 240,18 mol-gramo  $SO_3$

b) De formación de ettringita a partir del  $Al_2O_3^r$



P<sub>m</sub>: 101,96 516,52 = 240,18 mol-gramo  $SO_3$

0,8x15% = 12,0%  $C_3A$  aportado por el cemento P (15%  $C_3A$ ) al cemento de mezcla P/M 80/20, que fijarían 10,67%  $SO_3$

0,7x15% = 10,5%  $C_3A$  aportado por el cemento P (15%  $C_3A$ ) al cemento de mezcla P/M 70/30, que fijarían 9,33%  $SO_3$

0,6x15% = 9,0%  $C_3A$  aportado por el cemento P (15%  $C_3A$ ) al cemento de mezcla P/M 60/40, que fijarían 8,00%  $SO_3$

0,2x2,08% = 0,416%  $Al_2O_3^r$  aportado por la puzolana M "pura" al cemento de mezcla P/M 80/20, que fijarían 0,98%  $SO_3$

0,3x2,08% = 0,624%  $Al_2O_3^r$  aportado por la puzolana M "pura" al cemento de mezcla P/M 70/30, que fijarían 1,47%  $SO_3$

0,4x2,08% = 0,832%  $Al_2O_3^r$  aportado por la puzolana M "pura" al cemento de mezcla P/M 60/40, que fijarían 1,96%  $SO_3$

De donde se deduce que para pasar a ettringita todo el  $C_3A$  y  $Al_2O_3^r$  de cada cemento de mezcla citado, se necesitaría 30,45%, 23,23% y 20,54% de  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , respectivamente, los cuales pueden ser suministrados por el 33,33% del método de ensayo L-A, pero no por el 15,05% (=7,0%  $SO_3$ ) del método de ensayo ASTM C 452.

No obstante existen aún casos posibles mas desfavorables como pueden ser el de un cemento portland de un contenido de  $C_3A$  superior al 15%, y el de una puzolana "aluminica" cuyo porcentaje de  $Al_2O_3^r$  sea superior al 2,08% de la anterior M pura, como puede ser la derivada de los restos bauxíticos de la metalurgia extractiva del aluminio metal, en cuyo caso la fijación de  $SO_3$  podría estar próxima e incluso superar al 15,5% de  $SO_3$  del método de ensayo L-A.

De aquí que para poder tener una mayor garantía de que existe yeso agresivo en exceso para cualquier caso de cemento de mezcla PA ó PUZ de matriz cemento portland, sin que por ello se impidan

en su totalidad los procesos de fraguado y endurecimiento del sistema, se consideró oportuno fijar en 21,0% (=45,16%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), el contenido de  $\text{SO}_3$  de la mezcla-conglomerante cemento más yeso.

Finalmente para aprovechar las ventajas de ambos métodos acelerados de ensayo,

- del L-A, su extrema severidad junto a su posibilidad de aplicación contrastada a otros cementos además de a los portland, como puede ser los cementos de mezcla PA y PUZ entre otros, y
- del ASTM C 452, su sencillez, facilidad de manejo y rapidez de respuesta (al menos a la edad del ensayo de 28 días).

De aquí que además de a los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, solos, se considerase oportuno su aplicación adicional a una serie de cementos de mezcla PA y/o PUZ preparados intencionadamente para tratar de confirmar una vez mas y mediante este método de ensayo H-1,

- el comportamiento de las puzolanas seleccionadas para la realización de este trabajo, o sea, su "caracter", y
- el comportamiento de algunos cementos de mezcla PA y/o PUZ preparados al efecto, o proporcionados por distintas fábricas nacionales -caso de los ocho cementos PUZ industriales también ensayados- ya que no existía método acelerado alguno de parámetro  $\bar{A}L$  para los mismos.

Por todo ello, además de por las múltiples conclusiones afines obtenidas de lo realizado hasta el momento, es por lo que se creyó oportuno la HIBRIDACION de ambos, plasmada de hecho en uno de sus múltiples resultados posibles del "cruzamiento", en este caso, y en principio, el que se ha dado en llamar en este trabajo HIBRIDO-1, H-1, cuya descripción ó técnica operatoria ha sido idéntica en todo a la del método ASTM C 452-68, excepto, claro está que la mezcla-conglomerante cemento a ensayar mas yeso ha contenido un 21,0% de  $\text{SO}_3$  en lugar del 7,0%.

-----

(\*) NOTA.-- Del 100% de riqueza en metacaolín.

VIII.3.2.- Técnica Operatoria: Cálculo y Determinación de la Dosificación del Mortero y del Agua de Amasado y de Conservación de las Probetas.

Lógicamente según la razón dada en el apartado anterior tanto la Técnica Operatoria como los Cálculos y Determinaciones para la obtención de,

- la Dosificación del Mortero,
- la Cantidad de Agua de Amasado, y
- la Cantidad de Agua de Conservación,

se habrán de adaptar a los correspondientes del método acelerado de ensayo ASTM C 452, con las únicas excepciones en este caso de que,

- la dosificación de la mezcla-conglomerante se habrá de realizar de modo y manera que la misma posea un 21,0% de  $SC_3$ , al igual que se hizo en el apartado VII.2.1. de la PCP, y
- la determinación del Agua de Amasado, ó relación  $\frac{a}{c}$ , se realizó únicamente mediante el método de la "mesa de sacudidas" (flow=conte), dado que, en principio, la creación y utilización de este método ha sido a título de prueba, dejando para mas adelante la utilización adicional de la relación  $\frac{a}{c} = 0,485$  prescrita actualmente por la versión en vigor del método ASTM C 452-75.

Por otra parte y respecto a las probetas preparadas para la determinación en paralelo de los valores de los distintos parámetros adicionales, se operó de igual modo que en las correspondientes al método de ensayo ASTM C 452, tanto en cuanto a su conservación, como determinación de los mismos.

### VIII.3.3.- Resultados Experimentales Obtenidos

#### VIII.3.3.1.- De los Doce Cementos Portland 6 P y 6 PY, sólo: Discusión Interpretación.

##### Discusión VIII.3.3.1.

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$ , véase Tabla, 26, 27 y 77.

1.- Sea cual fuere el cemento portland de los doce ensayados, 6 P y 6 PY, el desarrollo y evolución de los valores de este parámetro,  $\bar{\Delta L}$ , a lo largo de todo el ensayo, es el de aumento constante, pero en distinta cuantía, según las edades consideradas del mismo y el contenido de  $C_3A$  del cemento portland, de modo y manera que por lo general,

- para el caso de los cementos P, tal aumento gradativo ha sido notable y exponencial de las edades intermedias del ensayo hasta la finalización del mismo, alcanzándose el comienzo de tales  $\bar{\Delta L}$  notables o elevados, tanto mas pronto, cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del mismo, y viceversa, y residiendo en ello la auto-destrucción de las probetas de algunos de tales cementos, precisamente las de los de mayor contenido de  $C_3A$ , y
- para el caso de los cementos PY, otro tanto aunque lógicamente sin llegar en este caso a la auto-destrucción de sus probetas respectivas.

Por lo tanto y en definitiva, en este caso se puede decir con aproximación cierta que los  $\bar{\Delta L}$  de las probetas de los cementos ensayados sufren una "aceleración" en la evolución de sus valores correspondientes de  $\bar{\Delta L}$  a una determinada edad del ensayo, por lo general, tanto mas temprana cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland así ensayado.

Por el contrario y en cuanto al parámetro derivado  $V_{cl}$  se produce desde el origen un descenso o ascenso notable, o no, hasta un valor máximo, seguido del correspondiente descenso (caso del P-32 y P-31), más o menos sinuoidal hasta alcanzar un valor mínimo a edades intermedias, pasadas las cuales se produce un ascenso notablemente rápido del mismo, hasta alcanzar en todos los casos de presencia de  $C_3A$ , en mucha o poca pero no escasa ó nula cantidad, el máximo valor correspondiente a este parámetro a la edad final de las probetas respectivas, la cual coincide tanto más con la final del ensayo cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, y viceversa. De igual modo, aquél valor mínimo respectivo, se alcanza, por lo general, tanto más pronto, cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado y viceversa, en cuyo caso extremo, el de la nulidad de dicho contenido, los valores de dicho paráme-

tro prácticamente disminuyen sinuosamente conforme transcurre el ensayo hasta su final.

Finalmente y en cualquier caso de presencia de  $C_3A$ , tal valor máximo respectivo de  $V_{cl}$  puede ser de mayor, igual ó menor orden que el correspondiente a la edad de 7 días, según sea muy elevado, mediano y bajo, respectivamente, el contenido de  $C_3A$  de cada cemento portland ensayado.

A continuación vale aquí prácticamente todo lo dicho al final de la discusión VIII.2.2.1, 1ª (método ASTM C 452-68), pero mayormente para aquellos cementos portland ensayados de contenido de  $C_3A < 8\%$ , pues en los de mayor contenido ocurre quizás tanto más todo lo contrario cuanto mayor es el mismo, aunque siempre en suficiente cantidad para su caracterización precisa durante los primeros 28 días de edad de las probetas respectivas y mediante su valor de  $\bar{\Delta L}_{28 d.}$  correspondiente.

2ª.- Las clasificaciones obtenidas de los 12 cementos portland 6 P y 6 PY, en función del valor del  $\bar{\Delta L}$  de sus probetas respectivas, de mayor a menor por este orden, a las edades fundamentales del ensayo de 14, 28, 365 y 730 días, han sido las siguientes, véase Tabla 27; las cuales han resultado ser lógicamente tanto mas coincidentes cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado y viceversa, en cuyo caso la coincidencia ha sido superior mediante el método ASTM C 452-68 que mediante éste solo H-1, a las edades iniciales del ensayo, pues a las finales lo han sido lógicamente bastante mas en este método H-1 que en aquél.

3ª.- En general, las dificultades operatorias derivadas del desmoldado de las probetas en este método de ensayo, han sido mayores que las correspondientes a igual fase del método ASTM C 452-68, aunque un operario responsable y lo suficientemente especializado las puede subsanar sin apuros.

4ª.- En el estudio comparativo de los doce cementos portland 6 P y 6 PY ensayados conforme indica expresamente,

- el presente método acelerado de ensayo, HIBRIDO-1, y

- el método acelerado de ensayo ASTM C 452-68,

se observa como, a igualdad de edad del ensayo, los valores del parámetro

derivado  $\frac{\bar{\Delta L}}{g. \text{ cemento}}$ , son mayores en este caso del H-1, que en aquél del ASTM C 452-68, siempre y cuando el cemento portland ensayado posea un

contenido de  $C_3A$  igual ó inferior al 9,30%, cemento P-32, (excepto en el caso del PY-2), pues en caso contrario, tal mayoría se produce sólo desde

la edad de 120 días en adelante, incluída la excepción anterior.

Además y según la interpretación VIII.2.2.3.4. anterior, tal mayoría deberá ser mas acusada aún respecto a los correspondientes valores que se obtuviesen mediante la versión ASTM C 452-75 del método de ensayo en cuestión aplicada a aquellos.

5\*.- En general durante los primeros 28 días del ensayo, suele transcurrir del 40% al 60% del  $\bar{A}L$  total que se puede originar en cada caso hasta la edad final del ensayo, siendo esta generalidad tanto mas acusada aún, cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, y viceversa, véase Tabla 26

6\*.- En este caso el valor de la relación  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$  osciló entre - 0,50 y 0,61.

#### Discusión VIII.2.3.1. (cont.)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta RMC$ ,  $\Delta RMF$ ,  $V_{\Delta RMF}$  y  $V_{\Delta RMC}$ , véase Tablas 28 y 29.

1\*.- Sea cual fuere el cemento portland de los doce, 6 P y 6 PY, la evolución,

- de los valores absolutos de la RMF y RMC,
- de los valores relativos ó incrementos porcentuales correspondientes  $\Delta RMF(\%)$  e  $\Delta RMC(\%)$ , y
- de las velocidades de crecimiento de los mismos,  $V_{\Delta RMF}$  y  $V_{\Delta RMC}$  ha sido,
- caso de los primeros, el aumento, tanto menor cuanto mayor es por lo general el contenido de  $C_3A$  del cemento ensayado, el cual se torna en disminución, proporcionalmente mas pronto aún en tales casos, que no en los opuestos,
- caso de los segundos, el de aumento, tanto mayor cuanto menor es el contenido del cemento portland ensayado,

de modo que las clasificaciones que se obtienen en función de la edad del ensayo a la que se alcanzare dicho valor máximo de RMF y RMC respectivo, han sido los siguientes.

RMF  $\rightarrow (PY-6) = (PY-4) = (PY-3) = (PY-2) > (PY-1) > (PY-5) = (P-5) > (P-31) = (P-32) > (P-4) > (P-2) = (P-1)$   
(días)  $\rightarrow$  730 730 730 730 355 120 120 28 28 21 14 14

RMC  $\rightarrow (PY-6) = (PY-4) = (PY-3) = (PY-2) > (PY-1) = (PY-5) = (P-5) > (P-32) > (P-1) > (P-31) = (P-4) = (P-2)$   
(días)  $\rightarrow$  730 730 730 730 355 365 365 90 50 28 28 21

siendo de las dos, la primera, la que mas se aproxima a la que se obtendría en función de los contenidos de  $C_3A$  de los cementos ensayados, de menor a mayor por este orden, y verificándose que el paralelismo existente entre las evoluciones de los

valores respectivos de ambos tipos diferentes de RM, no es absoluto, sino relativo, de manera que las edades de consecución de los valores máximos y/o mínimos respectivos, son casi siempre escasamente coincidentes, siendo los de la RMF y sus parámetros derivados, de dos a tres edades del ensayo mas tempranas que los correspondientes a la RMC y sus parámetros derivados.

- caso de los terceros, el de disminución rápida, generalizada y sinuosa hasta su práctica nulidad en todos los casos, pero con el hecho notable de que los máximos valores de los mismos se alcanzan durante los primeros 28 días del ensayo.

2ª.- Por lo general, a igualdad de edad,

- cualquiera del ensayo, para el caso de los parámetros RMF y RMC
- intermedia, en adelante, del ensayo, para el caso de los parámetros  $\Delta$ RMF e  $\Delta$ RMC,
- inicial de 7 días, para el caso de los parámetros  $V_c\Delta$ RMF y  $V_c\Delta$ RMC,

los valores de tales parámetros, suelen aumentar con la disminución del contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, siendo intrascendentes las clasificaciones que se pudieran obtener en función de los valores de tales parámetros y en función del citado contenido, por las excesivas discrepancias habidas entre ambas.

#### Discusión VIII.3.3.1.(cont.)

(G) Parámetro: Porosidad, véase Tabla 28.

1ª.- Sea cual fuere el cemento portland de los doce, 6 P y 6 PY, seleccionados y así ensayados, la evolución del contenido de poros de sus probetas respectivas, varía a lo largo del ensayo con sinuosidad regular semejante -más aún que en el caso del 7,0% de  $SO_3^-$ , excepto en el caso de los cementos (PY-4) y (PY-6), y de periodo también relativamente constante durante el mismo, de modo que,

- desde el momento inicial (desenmoldado de las probetas), hasta la edad de,

- . 7 días, en los cementos (P-4), (P-32), (PY-2) y (PY-3),
- . 14 días, en los cementos (P-1), (P-2) y (P-31),
- . 21 días, en los cementos (P-5), (PY-5) y (PY-1),
- . 28 días, en el cemento (PY-4), y
- . 90 días, en el cemento (PY-6),



disminuye en todos los casos, excepto en el caso del cemento (PY-4), (PY-6) y (P-4), que aumenta ligeramente hasta a edad de 14 días a partir de la cual se produce igualmente, con altibajos, o no, la disminución común del resto, antes aludida. No obstante y en cualquier caso tal valor mínimo de porosidad respectivo es el menor valor de todos los que alcanzare en su caso su cemento autor hasta el final del ensayo, (excepto en el (P-4) cuyo valor de 1 día es algo menor aún),

- desde la edad del valor mínimo respectivo anterior en adelante, aumenta hasta llegar a un máximo mayor variable según el tipo de cemento ensayado, pero que en general se alcanza tanto más pronto,
- . cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, y coincidiendo siempre en tales casos con la rotura de sus probetas respectivas (caso de los cementos (P-1) y (P-2), a la edad de 120 días, (P-4) a la edad de 270 días, (P-32) a la edad de 365 días y (P-31) a la edad de 545 días), y/o
- . cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  antes citado, (caso de los cementos (PY-2) y (PY-3), a la edad de 28 días, no así en cambio el (PY-4) que le ocurre a la edad de 150 días y el (PY-6) a la edad de 270 días), tras el cual se produce siempre una nueva disminución sinuoidal hasta la edad final del ensayo, y viceversa, o sea, tanto más tarde, y coincidente siempre con la edad final del ensayo, para aquellos cementos portland de los ensayados de contenido  $C_3A$  intermedio entre los dos contenidos extremos antes citados (caso de los cementos (P-5), (PY-5) y (PY-1), a la edad final del ensayo de 730 días).

En definitiva se puede decir que en todos los cementos P y PY así ensayados la representación gráfica de los valores correspondientes a la porosidad de sus probetas respectivas a lo largo del tiempo de duración del ensayo en cada caso, tiene la forma aproximada de una campana invertida, achatada ó plana, de brazos no semejantes.

Finalmente se observa el hecho de que mientras la curva que se obtendría uniendo las edades a que cada cemento ensayado ha obtenido su mínimo de porosidad correspondiente en sus probetas respectivas, es de una sinuosidad irregular, la de los máximos RS es una campana muy abierta,

- cuyo apoyo se corresponde con los cementos últimos citados, es decir el (P-5), (PY-5) y (PY-1), o sea los de contenido mediano a bajo de  $C_3A$ ),

- cuya rama lateral izquierda se corresponde con los cementos de elevado contenido de  $C_3A$ , es decir, el (P-1), (P-2), (P-4), (P-32) y (P-31), todos ellos con sus probetas destruidas por ataque sulfático, como se ha dicho anteriormente, antes de finalizar el ensayo, y
- cuya rama lateral derecha se corresponde con los cementos de bajo a nulo contenido de  $C_3A$ , es decir, el (PY-2), (PY-3), (PY-4) y (PY-6), todos ellos con sus probetas sin romperse aún lógicamente pese al severo ataque sulfático a que han sido sometidas.

2ª.- Hasta antes de la edad, por lo general de 28 días, en que se alcanza en cada caso concreto de cemento P ó PY ensayado, excepto el PY-6, el primer mínimo de porosidad correspondiente, se cumple, a grandes rasgos, que a igualdad de edad el contenido de poros de una familia de probetas dada respectiva aumenta con el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland constitutivo, de tal modo que las clasificaciones que se obtendrían de los mismos en función de dicho parámetro, de mayor a menor valor por este orden serían, a las edades fundamentales del ensayo de 7, 14, 28, 365 y 730 días, las siguientes:

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, en función de los valores del parámetro Porosidad: (aé todo H-1)
7	Porosidad	(P-2) > (P-32) > (P-31) > (P-1) > (P-4) > (PY-5) > PY-1 > (P-5) > (PY-3) > (PY-2) > (PY-6) > PY-4
14		(P-32) > (PY-3) > (P-4) > (PY-2) > (P-2) > (P-1) > P-1 > (PY-5) > (PY-1) > (PY-6) > (PY-4) > (P-5)
28		(P-32) > (P-2) > (PY-3) > (P-4) > (PY-2) > (P-1) > P-1 > (P-5) > (PY-5) > (PY-1) > (PY-6) > (PY-4)
365		(P-1) > (P-2) > (P-4) > (P-32) > (PY-5) > (P-31) > PY-2 > (PY-3) > PY-1 > (P-5) > (PY-4) > (PY-6)
730		(P-1), (P-2), (P-4), (P-32) y (P-31) > (P-5) > (PY-5) > (PY-1) > (PY-2) > (PY-3) > (PY-4) > (PY-6)

y al resto de las edades del ensayo serían como la de la edad de 14 ó 28 ó 365 días.

3ª.- Los valores de porosidad de las probetas,

- de los cementos portland (P) y (PY) solos, con 21,0% de  $SO_3$ ,
- de todos los cementos de mezcla preparados con las puzolanas D ó N con 7,0% de  $SO_3$ , y
- de los cementos de mezcla 70/30 y 60/40 mayormente, preparados con las puzolanas C, M y CV-10 principalmente con 7,0% de  $SO_3$ , son de un orden de magnitud muy parecido o similar, mientras que los de sus RMC y RMF respectivos son opuesto, siendo, por lo general bastante mayores durante todo el ensayo los de los

cementos de mezcla antes citados con el 7,0% de  $\text{SO}_3$  que los de sus cementos portland matrices respectivos solos

, con el 21,0% de  $\text{SO}_3$ . En definitiva que mientras los valores de porosidad no dicen apenas nada, de uno u otro caso, los de RMC y/o RMF correspondientes son en realidad los que están diciendo el grado de resistencia sulfática de la probeta, o sea, el estado mas o menos compacto de la misma en función de su grado de resistencia sulfática.

Discusión VIII.3.3.1. (cont.)

(H) Parámetros:  $V_u$ ,  $\Delta V_u$  y  $V_{\Delta V_u}$ , véase Tablas 28 y 30.

1ª.- Sea cual fuere el cemento P ó PY así ensayado, la evolución de los valores de  $V_u$  de sus probeta respectiva, es el de una campana de Gauss, mas ó menos abierta, según los casos, cuyo máximo respectivo, correspondiente a la autodestrucción de sus probetas, se consigue a distinta edad, de manera que,

- en el caso de los cementos de elevado contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , como son el (P-1), (P-2), (P-4) y (P-32), dicha campana de Gauss es incompleta, correspondiendo su curva representativa a la rama ascendente de la misma, y coincidiendo su máximo respectivo con la autodestrucción de sus probetas, la cual se alcanza siempre antes de finalizar el ensayo y tanto mas pronto conforme mayor es el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  de cemento P ensayado,
- en el caso de los cementos de mediano y bajo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , como son el (P-31), (P-5), (PY-5) y (PY-1), dicha campana de Gauss es completa, cuyo máximo se alcanza a distinta edad pero en general algo mas pronto cuanto mas  $\text{C}_3\text{A}$  tiene el cemento,
- en el caso de los cementos de muy bajo, escaso ó nulo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , como son el (PY-2), (PY-3), (PY-4) y (PY-6), dicha campana de Gauss es incompleta, como en el caso primero, pero con la diferencia de que en este caso su máximo respectivo se alcanza a la edad final del ensayo no pudiéndose discernir, obviamente, si el mismo es precisamente el máximo de dicha curva o un punto mas de su rama ascendente.

En cuanto al parámetro  $\Delta V_u$  se puede decir que es de aumento gradativo conforme transcurre el ensayo hasta alcanzar un valor máximo,

- bien a la edad final del ensayo,

- bien a una edad intermedia del ensayo, coincidente o no con la autodestrucción de la probeta, en cuyo último caso se produce la disminución en los valores de tal parámetro hasta la edad final del ensayo,

Es de destacar también que tales aumentos gradativos son tanto mas notables,

- a las edades iniciales del ensayo, que a las intermedias y sobre todo finales, en las cuales en cierta medida se podría decir en todos los casos que se mantiene constante en comparación a las iniciales, y
- cuanto mas  $C_3A$  tiene el cemento ensayado.

Y por último en cuanto al parámetro  $V_{edvu}$  se puede decir que la misma disminuye sinuosamente conforme transcurre el ensayo, siendo tal disminución tanto mas notable,

- a la edad de 14 días, que a las del resto del ensayo, a las cuales y por lo común se suele mantener con valores que bien pudieran titularse como despreciables, y
- cuanto mas  $C_3A$  tiene el cemento ensayado.

2ª.- Conforme transcurre el ensayo se cumple con mayor aproximación que a igualdad de edad, la  $V_u$  amenta con la cantidad de  $C_3A$  del cemento, a excepción del cemento (P-5), de modo que la clasificación que se obtendría a las edades fundamentales del ensayo en función de este parámetro de mayor a menor valor por este orden sería la siguiente:

Edad (días)	Parámetro	Clasificación de los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, en función de los valores del parámetro $V_u$ (método M-1).
7	$V_u$	(P-32) > (P-2) > (P-1) > (PY-1) > (P-4) > (PY-6) > (P-5) > (PY-3) > (P-31) > (PY-5) > (PY-2) > (PY-4)
14		(P-1) > (P-2) > (P-32) > (PY-1) > (PY-5) > (PY-2) > (P-31) > (PY-3) > (P-5) > (PY-6) > (PY-4) > (P-4)
28		(P-1) > (P-2) > (P-32) > (PY-5) > (P-31) > (PY-1) > (P-4) > (PY-2) > (PY-6) > (PY-4) > (P-5) > (PY-3)
90		(P-1) > (P-2) > (P-31) > (P-32) > (P-4) > (PY-5) > (PY-1) > (PY-2) > (PY-3) > (P-5) > (PY-6) > (PY-4)
365		(P-1) = (P-2) = (P-4) > (P-32) > (P-31) > (PY-5) > (PY-1) > (P-5) > (PY-2) > (PY-3) > (PY-6) > (PY-4)
730		(P-1) = (P-2) = (P-4) = (P-32) > (PY-3) > (PY-2) > (PY-6) = (PY-5) > (PY-4) > (PY-1) > (P-31) > (P-5)

siendo como se vé las clasificaciones expuestas de la edad de 90 días y 365 días las que mas se aproximan a la generalidad citada al principio, ya que todos los valores de  $V_u$  de las probetas aún "vivas" están en el valor máximo o van en su búsqueda, con la excepción citada del cemento (P-5).

De aquí que la clasificación a 730 días se aleje mucho de la generalidad citada puesto que muchos de los cementos, los de mediano y bajo contenido de  $C_3A$ , están en la rama descendente de la curva mientras que los de muy bajo, escaso o nulo contenido de  $C_3A$  están aún en la rama ascendente ó bien han llegado a su valor máximo, por tanto no deben ser comparables aquellos con éstos.

Por el contrario las clasificaciones que se obtienen en función de los parámetros derivados correspondientes, diferenciarían con cierta claridad relativa sólo a los cementos P de elevado contenido de  $C_3A$  de los PY de escaso contenido, aumentando solo ligeramente el poder de discriminación, resolución y ordenamiento,

- conforme transcurre el ensayo para el parámetro  $\Delta Vu$ , y
- a la edad de 7 días, tan solo, del ensayo para el parámetro  $Vc \Delta vu$ .

Discusión VIII.3.3.1.(cont.)

(I) Parámetros:  $SO_{4icp}^=$  y  $Vv$ , véase Tabla 30.

1.- En todos los cementos P ó PY ensayados de este modo, los valores alcanzados de este parámetro,  $SO_{4icp}^=$ , van creciendo conforme transcurre el ensayo, alcanzándose el máximo valor del mismo tanto mas pronto cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento, debido al agrietamiento de las probetas y, por consiguiente, al incremento de la superficie de contacto entre el yeso y el agua de conservación de las probetas, aunque en el mejor de los casos, cementos (P-1) y (P-2), no se alcanza antes de la edad de 90 días.

No obstante se observa como con mayor o menor rapidez, el mismo se va aproximando en todos los casos al valor de  $1,2g.SO_3/l$  (es la solubilidad del yeso en agua saturada de cal).

#### Interpretación VIII.3.3.1. (E)

Antes de pasar a realizar la interpretación correspondiente de estas discusiones, la misma se va a realizar de forma individualizada y coordinada dada la trascendencia de los valores obtenidos de cada parámetro.

De la Discusión 1ª: Véase el párrafo final de la interpretación VIII.2.2.1, 1ª, correspondiente al método de ensayo ASTM C 452-68 aplicado a los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, así ensayados, el cual es íntegramente aplicable en este caso.

Por ello en ausencia de  $C_3A$ , por mucha cantidad de agresivo aportado, no se podrá formar cantidad apreciable de  $ett-lf$  1ª necesaria y suficiente como para interrumpir la estabilidad de volumen inicial de las probetas, las cuales deberán continuar prácticamente de igual manera hasta la finalización del mismo, véase Tabla 26 y Fot. 5, (PY-4) y (PY-6).

Por otra parte, dado que la otra causa de expansión posible, formación de ettringita de origen  $Al^{3+}$  del  $C_4AF$  según sea el contenido del mismo y del  $C_2S$  y/o  $C_3S$  que le acompañe, está minimizada en este medio por lixivarse lentamente la portlandita -de origen hidratación ulterior del  $C_3S$  y  $C_2S$  mayormente- de las probetas a través de su agua interporos constitutiva de su agua de conservación en la que se encuentran sueltas, y carbonatarse la misma precipitándose como  $CO_3Ca$  en el fondo del recipiente que las contiene, difícilmente se podrán provocar tales expansiones ulteriores, ni de este origen, ni de cualquier otro, en particular por ejemplo, formación de  $ett-lf$  2ª, o de origen  $C_3A$ . Pues de esta manera y a tales edades ulteriores, el pH del medio, de 9 a 9,5, líquido o líquido de conservación las probetas, -posible reflejo del posible existente en los poros de las mismas-, no deberá de ser el suficiente y necesario para que esta última se origine, ni aún en el supuesto de que la misma se pudiera originar, pudiéndolo ser en cambio en aquel otro sistema, torta L-A, donde la relación: masa conglomerante selenitosa debe ser muy superior como así ha ocurrido en este trabajo.

Y de la causa posible aleatoria de la  $ett-lf$  de muy lenta formación de origen  $C_4AF$ , se hablará en la parte final de la interpretación de las discusiones.

Finalmente no se ha de olvidar tampoco que la presencia tan notable de yeso en las probetas de este método de ensayo H-1, deberá provocar en todas ellas un retraso notable tanto en la velocidad

de fraguado como en la de endurecimiento de las mismas, lo que en cierto modo deberá minimizar los efectos nocivos derivados de las expansiones primarias de cualquier origen y etiología, en especial en este caso de la ett-lf 2<sup>ria</sup>; la cual en las primeras edades del ensayo, al parecer hasta la de 90 días, deberá colmatar las probetas mas que expandirlas, véase Tabla 28, continuando de este modo el proceso hasta que endurezcan las probetas, véase valores de RMF y RMC en Tablas 28 y 29; a partir de cuyo momento en su caso -presencia aún apreciable de  $C_3A$  como tal-, deberá ocurrir todo lo contrario, es decir, expansiones ulteriores mas disgregantes que colmatantes y endurecedoras, con todas las consecuencias nocivas para las probetas, y tanto más pronto e intensamente, deberá empezar a ocurrir ello, cuanto mas  $C_3A$  posea el cemento portland ensayado y viceversa, como así ha ocurrido en este trabajo, puesto que cuanto mas tempranas son las mismas más idóneo portlandíticamente es el medio líquido para que se produzcan aquéllas y viceversa.

Y en cuanto a la evolución de los valores correspondientes al parámetro derivado Vol se puede decir con fundamento que ello es un indicio razonable de que pase a tener la ett-lf una Vf dada, la misma a su vez, debe venir condicionada por el grado de accesibilidad del agua de hidratación a los reactivos originarios,  $C_3A$  y yeso principalmente, ó velocidad de difusión a través del conjunto de poros de las probetas), la cual a su vez es función directa del grado de colmatación, en las edades iniciales (de 7 a 28 días), del sistema, que al no llegar a verificar jamás en su totalidad mas absoluta ni aún en el mejor de los casos (máximo contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado), podrá dar pie a que tarde o temprano aquella accesibilidad se verifique; pero como para entonces están bastante más fraguadas y endurecidas las probetas, la expansividad de la ett-lf 2<sup>ria</sup> originada correspondiente operará en sentido opuesto al citado antes, es decir, mayor expansividad que colmatación, que, en su caso, podrá originar incluso la autodestrucción selenitosa, bastante espectacular, en ocasiones, por su progresiva rapidez (aceleración) en llevarse a efecto, ó al menos una aún apreciable expansividad de las mismas si aún existe  $C_3A$  suficiente para ello, como así ha ocurrido en este trabajo con los cementos portland de elevado y mediano contenido de  $C_3A$ , o sea, el (P-1), (P-2), (P-4), (P-32) y (P-31), en el primer caso, (aceleración en su autodestrucción y tanto mayor cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del mismo, y viceversa), y con el resto en el segundo.

No obstante, lo que verdaderamente llama la atención en este caso del método H-1, por su contraste con lo ocurrido a tales cementos portland de mediano y elevado contenido de  $C_3A$ , principalmente, cuando se ensayaron según el método ASTM C 452-68, es que sobre todo, en los mismos, cuando,

- en éste método de ensayo H-1 se produce una aceleración de la  $V_{cl}$ , de sus probetas respectivas,
- en aquel método de ensayo, ASTM C 452-68, se produce una desaceleración brusca de los valores del mismo, lo cual viene a indicar indefectiblemente que,
- en este método de ensayo H-1 para entonces, no sólo las reacciones de formación de  $etf-lf$  no han finalizado, sino que es cuando mayor  $V_f$  experimentan, lo cual conduce a que cada cemento portland así ensayado llegue a provocar el máximo  $\Delta L$  de que es capaz en sus probetas respectivas, mientras que,
- en aquel método de ensayo ASTM C 452-68, deben de finalizar tales reacciones, por agotamiento expreso de alguno de los reactivos,
  - . ó bien del 7,0% de  $SO_3$  puesto como agresivo común, caso de los cementos P-1, P-2, P-4 y P-32,
  - . ó bien del  $C_3A$  del cemento portland ensayado, caso del P-31, P-5, PY-5, PY-1, PY-2, PY-3, PY-4 y PY-6.

Todo ello redundará lógicamente en que el diagnóstico derivado del valor del  $\Delta L$  a la edad de 28 días de las probetas de los cementos portland ensayados conforme indica, expresamente el método H-1, pueda ser mas preciso, dentro de su poder de predicción, que el correspondiente al ASTM C 452-68, con lo que de este modo se viene a confirmar, una vez más, el posible interés que puede llegar a despertar este método HIBRIDO-1 sobre todo para aquellos que tengan que diagnosticar ó decidir bajo su estricta responsabilidad la elección, o no, de un determinado cemento, a la luz de su dictamen.

De la Discusión 2ª: Probablemente todo ello se deba, entre otras causas, - a la razón dada en el extenso párrafo final de la interpretación VIII.2.2.1., 2ª, correspondiente a inténtico caso mediante el método ASTM C 452-68, y además

- a la distinta forma y tamaño de grano, sup. espf., de los cementos portland así ensayados, ya que las clasificaciones obtenidas de los mismos, sobre todo de los de mediano y elevado contenido, que no los de bajo, escaso ó nulo contenido de  $C_3A$ , por la razón anterior y lógicamente a las edades de 14 y 28 días más que a las edades de 365 y/o 730 días, resultan ser bastante coincidentes con las obtenidas en función de la superficie específica, de mayor a menor valor, por este orden, es decir, véase Tabla 76.



Y como confirmación de lo mismo está:

- a) el hecho de la no coincidencia de aquella con la correspondiente derivada del método L-A, pues en dicho método de ensayo, al tener que moler TCDCS los cementos a ensayar hasta que pasen íntegramente por el tamiz de  $88\mu\text{mm}$  de luz de malla, lógicamente las diferencias en los valores de dicho parámetro, superficie específica, se minimizarán bastante con lo que las discrepancias clasificatorias mediante aquél encontradas no podrán achacársele tanto a tal parámetro cuanto mas a otras causas como han sido las apuntadas en su interpretación anterior VIII.1.2.1. correspondiente, y también
- b) porque tanto unos cementos portland como otros, así ensayados (H-1), se deberán clasificar con mayor coincidencia con la clasificación derivada de su contenido de  $C_3A$  correspondiente, conforme transcurre el ensayo, pues de esta manera llegará a haber tiempo suficiente para que todo su  $C_3A$  y/o  $C_4AF$  respectivo pase a ett-1f, sea cual fuere de origen su finura de molido, como así ha ocurrido en este trabajo, y por último
- c) el tener que intervenir lógicamente dicho parámetro apuntado, sup. específica, tanto menos en el transcurso del ensayo cuanto menor sea el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado y viceversa; pues al haber poco o nada de  $C_3A$  la cantidad de ett-1f a formar será también escasa y su formación total mas pronta, por lo que mas rápida y coincidente será la clasificación correspondiente derivada, y de sobra por tanto a las edades finales de 365 y/o 730 días, como así ha ocurrido en este trabajo; no obstante las discrepancias habidas en este ensayo entre los cementos (PY-5) y (PY-1) podrían deberse en este caso al distinto tipo y grado de cristalinidad y por tanto de reactividad de su  $C_3A$  constitutivo, mientras que, -en el caso del cemento (P-5) si se pusiera a una sup. espf. de  $2800\text{ cm}^2/\text{g}$  puede que se subsanara la anomalía en él encontrada, la cual confirmaría todo lo anterior, -y en el caso de los cementos (PY-4) y (PY-6), las anomalías encontradas entrambos no pueden explicarse con tan sólo este parámetro  $\bar{A}L$  del presente método H-1.

De la Discusión 3ª: Lógicamente ello se ha de deber necesariamente al exceso de retardador de fraguado, yeso, 45,16%, que porta la mezcla-conglomerante cemento mas yeso de este método de ensayo, el cual hará que la misma fragüe y se endurezca con bastante mas

lentitud que el correspondiente al método ASTM C 452-68, con 15,03% de yeso. De aquí que ello bien pudiera subsanarse,

- o manteniendo por mas tiempo, de 2 a 3 ó 4 días quizás, las probetas en sus moldes y estos en la C.H., antes de desmoldarlas,
- o utilizando como agresivo yeso hidratado  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  y/o anhidrita soluble,  $\text{CaSO}_4$ , pero siempre y cuando el fraguado e hidratación ulterior del (los) mismo(s) no afecte al  $\bar{\Delta L}$  que debiera originar con posterioridad cada cemento ensayado, aunque no obstante y aún en este caso se podría subsanar conociendo previamente la parte proporcional de expansión que sería debida a la hidratación de la cantidad de agresivo única y exclusivamente, no sin poder evitar pese a ello errores apreciables que afectarían al resultado final del propio método de ensayo.

De la Discusión 4\*: En principio ello es la confirmación evidente, una vez mas, de que el mecanismo topoquímico con o sin disolución previa debe de prevalecer sobre el de "through-solution" para llevarse a cabo la formación de la ettringita, pues tan sólo "acercando de la mano" -añadir mas yeso agresivo en defecto de cemento portland- el yeso al  $\text{C}_3\text{A}$ , podrá originarse en todos los casos la ettringita total que debe.

Por otra parte también es la confirmación evidente de las mejores y mayores posibilidades de este método de ensayo sobre el ASTM C 452, para poder predecir con mayor precisión y en cortos periodos de tiempo, el grado de RS de un cemento portland dado; pues aún en los casos menos aconsejables, los de elevado contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  de aquellos, se originarán unos valores de  $\bar{\Delta L}$  en sus probetas respectivas, lo suficientemente elevados como para diagnosticar su descarte con precisión y sin temor alguno a equivocarse.

De la Discusión 5\*: Valen aquí íntegramente, los párrafos finales de la interpretación VIII.2.2.1, 1\*, correspondiente a igual caso estudiado mediante el método ASTM C 452-68.

Interpretación VIII.3.3.1 (F)(H)

De la Discusión 1ª y 2ª: El conocido efecto de retardador del fraguado de la piedra natural de yeso molida, añadida como agresivo al cemento, ha de llevar obviamente implícito un efecto también retardador del endurecimiento del mismo, el cual lógicamente habrá de ser mayor aún en aquel sistema con participación mayoritaria de ett-lf. Puesto que si en el fraguado y endurecimiento de tales cementos portland de elevado contenido de  $C_3A$ , como se vió en el caso de las mezclas-conglomerantes homónimas del 7,0%  $SO_3$ , forma parte la ett-lf y ésta es expansiva, ello habrá de impedir mas aún dicho endurecimiento por la hidratación de su  $C_3S$  y/o  $C_2S$  y/o  $C_4AF$  constitutivos, lo cual no se deberá verificar en caso contrario, como así ha ocurrido en este trabajo.

No obstante en ambos casos extremos de ausencia, ó no, de  $C_3A$  y sus afines, se llega a alcanzar el endurecimiento del sistema, obviamente tanto mas pronto cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  y viceversa. Pese a lo cual, y en este último caso, puesto que la cantidad de ett-lf no debe de haber sido la total probable y si en cambio la parcial posible - función del tiempo de endurecimiento y cantidad total posible por formar respectiva-, la residual, una vez endurecido el sistema (mas tarde cuanto mas  $C_3A$  tenga el cemento portland ensayado), podrá actuar de cuña expansora, agrietando la probeta hasta su autoestructura total, tanto mas rápidamente cuanto mas  $C_3A$  tenga el cemento, así como también el máximo PMF y/o RMC, correspondientes y disminuciones ulteriores de los mismos;

todo ello además junto al probable efecto coimatante (de agua de conservación selenitosa y productos de reacción) inherente lógicamente al expansivo que tiene aquella, por eso el parámetro Vu aumenta durante el transcurso del ensayo no acusando aumentos notables de porosidad y si en cambio apreciables de colmatación que deberá ser la citada, residiendo en ello, por tanto, amén de otras causas adicionales, el efecto acelerador de auto-destrucción.

Y todo ello sin olvidar además la posible acción sinérgica habido entre el ión  $Al^{3+}$  de parte, del total de  $C_3A$  original, hidratado, y el resto aún anhidro, el cual antes de pasar a ettringita se encontraría quizás en igual situación a como se encuentra la  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana M y el  $C_3A$  del cemento P-1 ó P-2 ó P-nº, en cualquiera de sus cementos de mezcla correspondientes 80/20, 70/30 ó 60/40, para originar como se ha visto en sus tortas y probetas respectivas la acción sinérgica ya referida. Y para que así ocurriera lógicamente se necesitaría un tiempo para que parte del  $C_3A$  pase a su hidrato mas adecuado correspondiente (¿ 14, 28, 60, 120, 150, 180...días ?) lógicamente tanto mas tarde y después de la edad de 180 días cuanto menor fuere el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, y viceversa, en cuyo caso la acción sinérgica ó auto-aceleración antes citada respectiva -inmediata a la auto-destrucción selenitosa de la probeta-, se deberá de verificar mucho antes de tal edad de 180 días, a la cual las probetas H-1 de los cementos portland P-1 (14,11%  $C_3A$ ) y P-2 (11,09%  $C_3A$ ), e incluso también prácticamente del P-4 (10,71%  $C_3A$ ), se han auto-destruido.

Interpretación VIII.3.3.1 (G)

De la Discusión 1<sup>a</sup>:

- Caso de los cementos (P-1), (P-2), (P-4), (P-32), (P-31), (P-5) (PY-5) y (PY-1), a los que se puede aplicar idéntica razón corregida y aumentada, dada para los mismos en el caso del 7,0% de  $SO_3$  hasta cuando alcanzaron, a la edad intermedia del ensayo, variable de unos a otros, su valor máximo de porosidad respectivo, y donde como se recordará se relacionaba tal edad de consecución respectiva con la finalización de la reacción de formación de ett-lf por carencia, mejor "consumo total", de uno de los reactivos,  $C_3A$  ó  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  según el contenido de  $C_3A$  de los cementos portland aquí ensayados. Pero en este caso del 21,0% de  $SO_3$ , hay, por estequiometría,  $(21,0\% SO_3 \times 23,62\% C_3A) > 14,11\%$  de  $C_3A$  del cemento P-1), cantidad suficiente para que todo el  $C_3A$  de los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, ensayados, pase a ett-lf, la cual a igualdad de cemento, es mayor, como se puede comprobar, en este caso que el homónimo del 7,0% de  $SO_3$ ,

366,96 g. P-1 en mezcla-conglomerante con 7,0% de  $SO_3$ , tienen 366,96 x 0,27 = 98,872 g.  $SO_3$  que podrán originar  $\Rightarrow$  132,41 g. ett-lf;

234,79 g. P-1 en mezcla-conglomerante con 21,0%  $SO_3$ , tienen 234,79 x 0,1411 = 33,1289 g.  $C_3A$  que podrán originar  $\Rightarrow$  151,68 g. ett-lf,

o sea  $\frac{132,41}{366,96} = 0,36$  g. ett-lf/1 g. de cemento P-1 en el método ASTM  
contra  $\frac{151,68}{234,79} = 0,65$  g. ett-lf/1 g. de cemento P-1 en el método H-1,

por tanto interesa más este último que aquél, de aquí la razón del posible interés del mismo para determinar el grado de RS a un cemento portland dado.

Por otra parte, la rotura, ó no, de la probeta dependerá por tanto de la cantidad total de ett-lf formada, la cual deberá ser menor cuanto menor sea el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland y consiguientemente deberá originar, a igualdad de edad, en general, menor porosidad y por tanto y a partir de un determinado contenido de  $C_3A$  del cemento portland hasta los de contenido nulo, no se deberá romper, como así ha ocurrido en este trabajo, caso de las probetas de los cementos (P-5), (PY-5), (PY-1), (PY-2), (PY-3), (PY-4) y (PY-6).

- Caso de los cementos (PY-4) y (PY-6) en los que la creación, evolución y desarrollo de los valores de porosidad de sus probetas a lo largo del ensayo ha sido en este caso, sinuosa al igual

que les ocurrió a todos los cementos portland ensayados con el 7,0% de  $\text{SO}_3$ , como era lo lógico.

Y la no coincidencia de fechas en la consecución de sus correspondientes mínimos y máximos de porosidad en sus probetas respectivas y homónimas (las del 7,0% y las del 21,0% de  $\text{SO}_3$ ), puede deberse a que al ser por estequiometría, mayor la cantidad de ett-lf ó de origen  $\text{C}_3\text{A}$ , en el caso del 7,0% que en el caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$ , (en el supuesto probable de que ambos cementos tengan  $\approx 1,0\%$  de  $\text{C}_3\text{A}$ , pese a su nulidad por cálculos de Bogue), pues

- caso del 7,0% de  $\text{SO}_3$ :

- . 360,83 g. de PY-4 aportarían  $360,83 \times 0,01 = 3,6083$  g. de  $\text{C}_3\text{A}$  que podrían originar 16,52 g. ett-lf
- . 357,18 g. de PY-6 aportarían  $357,18 \times 0,01 = 3,5718$  g. de  $\text{C}_3\text{A}$  que podrían originar 16,35 g. ett-lf

- caso del 21,0% de  $\text{SO}_3$ :

- . 230,87 g. de PY-4 aportarían  $230,87 \times 0,01 = 2,3087$  g. de  $\text{C}_3\text{A}$  que podrían originar 10,57 f. ett-lf
- . 228,53 g. de PY-6 aportarían  $228,53 \times 0,01 = 2,2853$  g. de  $\text{C}_3\text{A}$  que podrían originar 10,46 g. ett-lf

y estar mas fraguado y endurecido el primer sistema, 7,0% de  $\text{SO}_3$ , que el segundo, 21,0% (confírmese por comparación de sus valores de RMC y RMP respectivas), hará que la ett-lf que se haya de formar en aquél, 7,0% de  $\text{SO}_3$ , por escasa que fuese, que además es la mayor, sería mas disruptiva que en éste, 21,0% de  $\text{SO}_3$ , y consiguientemente originaría mas pronto el mínimo y máximo de porosidad respectivos, como así ha ocurrido en este trabajo.

De la Discusión 3ª: Lógicamente la notable porosidad habida tanto en las probetas de los cementos P y PY (sobre todo en los primeros) con 21,0% de  $\text{SO}_3$ , como en las de los cementos de mezcla preparados con las puzolanas C, CV-10 ó M, con 7,0% de  $\text{SO}_3$ , se ha de deber mayormente a la porosidad provocada por la expansividad inherente a la formación de la ett-lf y ett-rf, originadas respectivamente por tales cementos, como ya se dijera en sus interpretaciones correspondientes. Por el contrario la notable porosidad del mismo, de parecido rango a la anterior, obtenida en las probetas correspondientes a los de los cementos de mezcla con 7,0% de  $\text{SO}_3$  preparados con las puzolanas D ó N, se ha de deber mayormente a las características morfológicas propias de tales puzolanas "estuches huecos", como ya se dijera en su interpretación correspondiente, habiendo

de ser escasamente imputable en este caso a la formación de ett-lf y/o ett-rf por la conocida dificultad que los geles tobermorfíticos de neoformación y origen  $\text{SiO}_2^{\text{r}}$  de tales puzolanas oponen al trasiego iónico necesario para la formación de ambas.

Todo ello es además la prueba irrefutable demostrativa de la falta total de sensibilidad, poder de resolución, discriminación y ordenamiento que posee este parámetro, determinado mediante la técnica experimental empleada para poder calificar y diferenciar a los cementos P, como PY, PA y PUZ, resistentes al ataque de los iones sulfato de los que no lo son tanto.

#### Interpretación VIII.3.3.1. (I)

Ello es señal inequívoca de que pese al máximo consumo de  $\text{SO}_3$  habido del 21,0% inicial para formar ett-lf en el caso del cemento P-1, aún ha de seguir sobrando yeso que es el que con su gradativa solubilización mayor, cuanto mayor es la porosidad de la probeta y cuanto mayor es el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  de su cemento (pues así se habrá podido formar mas ett-lf disruptiva) mas pronto saturará a su agua de conservación, como así ha sucedido en este trabajo, véase Tabla 30.

Ello se confirma además por estequiometría puesto que el cemento P-1 al tener un 14,11% de  $\text{C}_3\text{A}$  ha de ser el que mas cantidad de  $\text{SO}_3$  fije de todos, del 21,0% púéstole como agresivo - en este caso por estequiometría un 12,54%, con lo que, en el peor de los casos de máxima fijación de  $\text{SO}_3$  agresivo, como es el presente del cemento P-1, aún quedaría un 21,0% - 12,54% = 8,46% de  $\text{SO}_3$  sin consumir equivalente a 18,19% de yeso que dada la dosificación empleada (293,49 g. cemento P-1 y 206,51 g. yeso por tongada de 500 g. de cemento en yeso), equivale a 37,49 g. de yeso sin disolver por tongada o lo que es lo mismo = 74,98 g. de yeso sin disolver entre todas las probetas, equivalente a = 34,87 g.  $\text{SO}_3$  sin disolver entre ocho probetas de 1" x 1" x 11½", o sea 4,36 g.  $\text{SO}_3$ /probeta de 1" x 1" x 11½", es decir cantidad mas que suficiente para provocar mas pronto o mas tarde la solubilidad del yeso en agua saturada de cal.

Por último y antes de finalizar esta interpretación se ha de destacar como mediante los parámetros porosidad y Vu se confirma con claridad que nada mas provocarse artificialmente la primera por la expansividad de la ett-lf 1<sup>ria</sup>, la misma se debe de colmar por líquido de conservación que nada mas penetrar en la probeta

se vuelve selenitoso, para de este modo dar lugar a que se provoque en su caso, mas ett-1f, ya para entonces 2<sup>da</sup>, cuya expansividad aumenta aún mas la porosidad de la probeta, y así sucesivamente, de modo y manera que el proceso se auto-acelera gradativamente a modo de "reacción en cadena" a diferencia de como ocurre en el método ASTM C 452 en el que dicho proceso se des-acelera o detiene por falta del SO<sub>3</sub> necesario y suficiente para que se mantenga, en su caso, la reacción de formación de ett-1f, de aquí que las probetas de los cementos portland P-1, P-2, P-4, P-32 y P-31 se hayan autodestruido en el método H-1, mientras que en el ASTM C 452, no.

No obstante y como en el mejor de los casos, dos tan sólo de entre doce, los cementos (P-1) y (P-2), la auto-destrucción selenitosa de las probetas se ha originado a la edad de 120 días -edad ésta, potencialmente tardía para los fines de un método acelerado de ensayo- se ha creído oportuno y conveniente realizar cálculos similares a los realizados en el método ASTM C 452-68 para tratar de obtener los valores de los números enteros comprendidos entre 0% y 14%, respectivamente, así ensayados, H-1. De aquí que por inter y extrapolación lineal fraccionada de los valores de  $\Delta L$  obtenidos mediante este método de ensayo, H-1, de los doce cementos portland ensayados 6 P y 6 PY, se ha obtenido la Tabla 75,

Tabla 75  
Dilatación longitudinal de probetas de 1" x 1" x 11 1/2" de mortero  
1 : 2,75 de cemento portland -de distinto contenido teórico entero  
de C<sub>3</sub>A- con un contenido de 21,0% de SO<sub>3</sub>, según el método de ensayo  
HIBRIDO-1.

Contenido de C <sub>3</sub> A (%)	$\Delta L$ (%) a la edad de :	
	14 (días)	28 (días)
14	0,141	0,166
13	0,107	0,153
12	0,096	0,139
11	0,079	0,128
10	0,073	0,134
9	0,067	0,114
8	0,062	0,099
7	0,038	0,057
6	0,036	0,045
5	0,034	0,040
4	0,032	0,043
3	0,029	0,035
2	0,021	0,025
1	0,017	0,024
0	-	0,008

Tabla 76

Cementos Portland:	
de elevado a mediano,	de mediano a escaso,
contenido de C <sub>3</sub> A (%)	
P-31 > P-1 > P-32 > P-4 > P-2 3245 > 3182 > 3082 > 3069 > 3015 (cc/g.)	PY-5 > PY-1 > P-5 > PY-3 > PY-2 3180 > 3066 > 3000 > 3190 > 3093 (cc/g.)



de la que se pueden deducir, sin la disminución en principio de las 5 milésimas de rigor al igual que se hiciera en origen en el método ASTM C 452, los valores correspondientes de  $\bar{\Delta L}$  máximo que deberá de alcanzarse, a la edad de 14 ó 28 días, un cemento portland,

- de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato" (contenido de  $C_3A < 5\%$  y  $C_4AF + 2 C_3A < 25\%$ )  $\bar{\Delta L}_{14d} \leq 0,034\%$  e  $\bar{\Delta L}_{28d} \leq 0,044\%$ ,
- de "moderada resistencia al ataque de los iones sulfato" (contenido de  $C_3A < 8\%$ ) ...  $\bar{\Delta L}_{14d} \leq 0,062\%$  e  $\bar{\Delta L}_{28d} \leq 0,095\%$

Pues bien, según ello, los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, así ensayados (H-1) resultaron calificados y confirmados como tales excepto el PY-5 que no resultó calificado de elevada RS, lo cual confirma la gran severidad del método de ensayo en cuestión, así como también que el valor frontera de contenido de  $C_3A$  entre los cementos portland P y PY debería ser el 4% y no el 5% como ocurre en la actualidad.

No obstante y puesto que del estudio comparativo de los valores absolutos del  $\bar{\Delta L}$  y relativos,  $Vcl$  e  $\frac{\bar{\Delta L}}{g. cemento}$ , proporcionados por las probetas de cada cemento portland ensayado según indica el método ASTM C 452 e H-1, véase Tablas 27 y 77, se deduce que por lo general y a igualdad de cemento portland los valores del parámetro  $Vcl$ , sinónimo de velocidad de formación de etf-lf, correspondientes al método ASTM C 452-68, son mayores que los homónimos del método H-1 durante todas las edades iniciales del ensayo (hasta 28 días) e intermedias sólo hasta la de 60, 90, 120 ó 150 según los casos (con la excepción de los cementos PY-5 y PY-2, hasta 270 y 545 días respectivamente), ocurriendo todo lo contrario y con bastante mayor diferencia que antes, durante el resto de las edades respectivas del ensayo hasta la de 730 días; ello dá pie para comprender que si lógicamente la edad calicatoria elegida para el caso ASTM C 452 puede ser la de 14 días, pese a que a la misma no se produzca en ningún caso la mayor parte del total de las reacciones expansivas que hayan de tener lugar en las probetas del cemento portland ensayado, véase Tabla 26, la del método H-1 no debe ni puede ser también la de 14 días, por los dos motivos citados anteriores, es decir, el de la menor  $Vcl$  de las probetas y por tanto el de la menor cantidad de reacciones expansivas del total a formar, ambas, en este caso, H-1, que en aquél, ASTM C 452-68. Por lo que la edad ideal debería ser al menos aquella a la que se produce el comienzo de la auto-aceleración de las reacciones expansivas, la cual en el mejor de los casos

ha resultado estar comprendida entre los 60 y 90 días, caso de los cementos portland PY-3, PY-4, PY-6 y P-1, respectivamente, o en su defecto por poder resultar ser ambas demasiado elevadas la inicial más próxima, la cual no sería otra que la de 28 días, edad ésta a la cual y en este método de ensayo también han debido de transcurrir la mayoría de las reacciones expansivas derivadas de la  $\text{ett-lf}$  o de origen  $\text{C}_3\text{A}$ , véase los valores de la  $\text{Vol}$  correspondientes, pues las producidas en casi todos los casos hacia las edades finales preferen

temente no deberían seguir siendo de dicho origen  $\text{C}_3\text{A}$  sino más bien y en su caso - método L-A-del ión  $\text{Al}^{3+}$  de origen  $\text{C}_4\text{AF}$ , siempre y cuando exista para entonces en el líquido intersticial de las probetas cantidad de portlandita necesaria y suficiente para tal fin.

Por otra parte y a la vista de los resultados experimentales obtenidos cabe decir que, en principio, la idea matriz de este método acelerado de ensayo, HIBRIDO-1, podría llegar a resultar válida bien tal cual, o sea, con el 21,0% de  $\text{SO}_3$  en su mezcla-conglomerante cemento a ensayar más yeso, bien con sólo el 14,0% ó el 15,0% de  $\text{SO}_3$ , según convenga, en la misma, pues de este modo se podría quizás obviar en parte la falta de fraguabilidad apreciada en algunas ocasiones en determinadas probetas del H-1 durante el primer día de edad de las mismas, y con ello las dificultades correspondientes a la hora de su desenmoldado a tal edad.

De igual modo y puesto que el distinto grado de finura de molido o superficie específica de los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, así ensayados, bien mediante el método de L-A ó ASTM C 452 ó H-1, ha resultado ser origen de apreciables discrepancias obtenidas entre las múltiples clasificaciones realizadas, entre y mediante los mismos, así como también y en su caso origen de posibles errores a la hora de tener que juzgarlo(s) o calificarlo(s) y cualificarlo(s) a alguno(s) de ellos para un findado a la luz del dictamen de cada uno de ellos, se cree conveniente y necesario que la posible aminoración de tales errores podría quizás alcanzarse mediante la fijación de tal parámetro en todos ellos, o mejor, de sus clínkers correspondientes, el cual y en principio podría fijarse en 2600 ó 2800  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Y como se podrá observar en los apartados venideros para los cementos de mezcla PA y PUA se puede hacer otro tanto y por idéntico motivo y mayor razón aún, a lo realizado en igual caso mediante el método ASTM C 452, es decir, que la anterior especificación,  $\bar{A}_{28d}$ , deducida para los cementos portland de elevada y moderada RS así ensayados, método N-1, puede ser perfectamente válida, en este caso con mayor razón, para poder calificar y cualificar a los cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes, puesto que la propia auto-aceleración de la reacción de formación de la ettringita de origen  $C_3A$  junto con la mayor Vf de la ettringita de origen  $Al_2O_3$  de la puzolana de turno que lo acompaña y la acción sinérgica resultante de ambas en cada caso, deberá originar, en el peor de los casos, la mayor parte de la formación total de ettringita a formar en cada uno, durante los primeros 18 días de edad de las probetas (y más concretamente durante los primeros 14 días de las mismas, en ocasiones), como así ha ocurrido claramente en esta ocasión con la mayoría de las probetas de los cementos de mezcla preparados e igualmente ensayados, véase el apartado venidero VIII.3.3.2 y sus sub-apartados correspondientes.

\* Véase NOTA de la pag. 209.

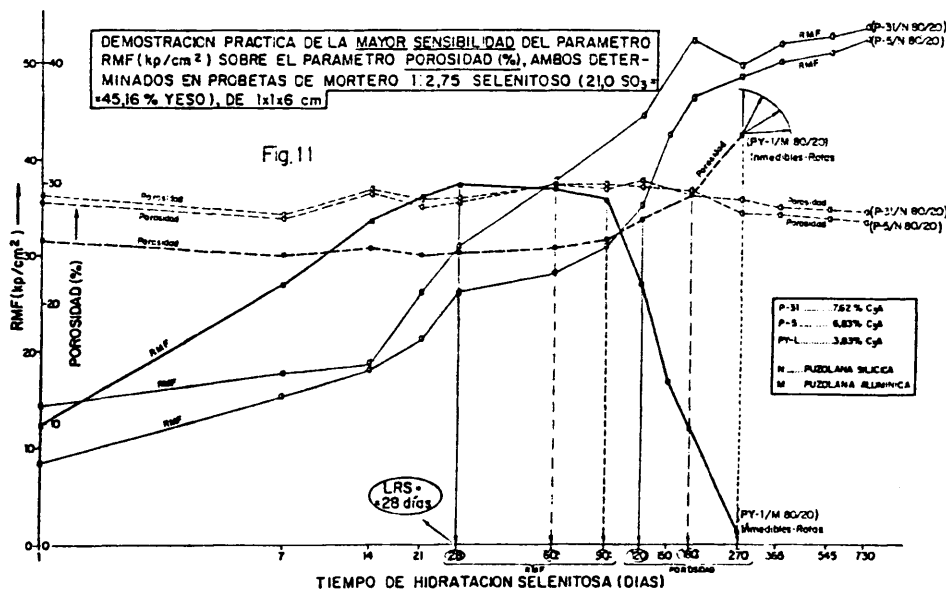


TABLA 77

Cód.	CEMENTOS P										CEMENTOS PY									
	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10	PY-1	PY-2	PY-3	PY-4	PY-5	PY-6	PY-7	PY-8	PY-9	PY-10
7	2.31	2.32	2.33	2.34	2.35	2.36	2.37	2.38	2.39	2.40	2.41	2.42	2.43	2.44	2.45	2.46	2.47	2.48	2.49	2.50
14	2.41	2.42	2.43	2.44	2.45	2.46	2.47	2.48	2.49	2.50	2.51	2.52	2.53	2.54	2.55	2.56	2.57	2.58	2.59	2.60
21	2.51	2.52	2.53	2.54	2.55	2.56	2.57	2.58	2.59	2.60	2.61	2.62	2.63	2.64	2.65	2.66	2.67	2.68	2.69	2.70
28	2.61	2.62	2.63	2.64	2.65	2.66	2.67	2.68	2.69	2.70	2.71	2.72	2.73	2.74	2.75	2.76	2.77	2.78	2.79	2.80
35	2.71	2.72	2.73	2.74	2.75	2.76	2.77	2.78	2.79	2.80	2.81	2.82	2.83	2.84	2.85	2.86	2.87	2.88	2.89	2.90
42	2.81	2.82	2.83	2.84	2.85	2.86	2.87	2.88	2.89	2.90	2.91	2.92	2.93	2.94	2.95	2.96	2.97	2.98	2.99	3.00
49	2.91	2.92	2.93	2.94	2.95	2.96	2.97	2.98	2.99	3.00	3.01	3.02	3.03	3.04	3.05	3.06	3.07	3.08	3.09	3.10
56	3.01	3.02	3.03	3.04	3.05	3.06	3.07	3.08	3.09	3.10	3.11	3.12	3.13	3.14	3.15	3.16	3.17	3.18	3.19	3.20
63	3.11	3.12	3.13	3.14	3.15	3.16	3.17	3.18	3.19	3.20	3.21	3.22	3.23	3.24	3.25	3.26	3.27	3.28	3.29	3.30
70	3.21	3.22	3.23	3.24	3.25	3.26	3.27	3.28	3.29	3.30	3.31	3.32	3.33	3.34	3.35	3.36	3.37	3.38	3.39	3.40
77	3.31	3.32	3.33	3.34	3.35	3.36	3.37	3.38	3.39	3.40	3.41	3.42	3.43	3.44	3.45	3.46	3.47	3.48	3.49	3.50
84	3.41	3.42	3.43	3.44	3.45	3.46	3.47	3.48	3.49	3.50	3.51	3.52	3.53	3.54	3.55	3.56	3.57	3.58	3.59	3.60
91	3.51	3.52	3.53	3.54	3.55	3.56	3.57	3.58	3.59	3.60	3.61	3.62	3.63	3.64	3.65	3.66	3.67	3.68	3.69	3.70
98	3.61	3.62	3.63	3.64	3.65	3.66	3.67	3.68	3.69	3.70	3.71	3.72	3.73	3.74	3.75	3.76	3.77	3.78	3.79	3.80
105	3.71	3.72	3.73	3.74	3.75	3.76	3.77	3.78	3.79	3.80	3.81	3.82	3.83	3.84	3.85	3.86	3.87	3.88	3.89	3.90
112	3.81	3.82	3.83	3.84	3.85	3.86	3.87	3.88	3.89	3.90	3.91	3.92	3.93	3.94	3.95	3.96	3.97	3.98	3.99	4.00
119	3.91	3.92	3.93	3.94	3.95	3.96	3.97	3.98	3.99	4.00	4.01	4.02	4.03	4.04	4.05	4.06	4.07	4.08	4.09	4.10
126	4.01	4.02	4.03	4.04	4.05	4.06	4.07	4.08	4.09	4.10	4.11	4.12	4.13	4.14	4.15	4.16	4.17	4.18	4.19	4.20
133	4.11	4.12	4.13	4.14	4.15	4.16	4.17	4.18	4.19	4.20	4.21	4.22	4.23	4.24	4.25	4.26	4.27	4.28	4.29	4.30
140	4.21	4.22	4.23	4.24	4.25	4.26	4.27	4.28	4.29	4.30	4.31	4.32	4.33	4.34	4.35	4.36	4.37	4.38	4.39	4.40
147	4.31	4.32	4.33	4.34	4.35	4.36	4.37	4.38	4.39	4.40	4.41	4.42	4.43	4.44	4.45	4.46	4.47	4.48	4.49	4.50
154	4.41	4.42	4.43	4.44	4.45	4.46	4.47	4.48	4.49	4.50	4.51	4.52	4.53	4.54	4.55	4.56	4.57	4.58	4.59	4.60
161	4.51	4.52	4.53	4.54	4.55	4.56	4.57	4.58	4.59	4.60	4.61	4.62	4.63	4.64	4.65	4.66	4.67	4.68	4.69	4.70
168	4.61	4.62	4.63	4.64	4.65	4.66	4.67	4.68	4.69	4.70	4.71	4.72	4.73	4.74	4.75	4.76	4.77	4.78	4.79	4.80
175	4.71	4.72	4.73	4.74	4.75	4.76	4.77	4.78	4.79	4.80	4.81	4.82	4.83	4.84	4.85	4.86	4.87	4.88	4.89	4.90
182	4.81	4.82	4.83	4.84	4.85	4.86	4.87	4.88	4.89	4.90	4.91	4.92	4.93	4.94	4.95	4.96	4.97	4.98	4.99	5.00
189	4.91	4.92	4.93	4.94	4.95	4.96	4.97	4.98	4.99	5.00	5.01	5.02	5.03	5.04	5.05	5.06	5.07	5.08	5.09	5.10
196	5.01	5.02	5.03	5.04	5.05	5.06	5.07	5.08	5.09	5.10	5.11	5.12	5.13	5.14	5.15	5.16	5.17	5.18	5.19	5.20
203	5.11	5.12	5.13	5.14	5.15	5.16	5.17	5.18	5.19	5.20	5.21	5.22	5.23	5.24	5.25	5.26	5.27	5.28	5.29	5.30
210	5.21	5.22	5.23	5.24	5.25	5.26	5.27	5.28	5.29	5.30	5.31	5.32	5.33	5.34	5.35	5.36	5.37	5.38	5.39	5.40
217	5.31	5.32	5.33	5.34	5.35	5.36	5.37	5.38	5.39	5.40	5.41	5.42	5.43	5.44	5.45	5.46	5.47	5.48	5.49	5.50
224	5.41	5.42	5.43	5.44	5.45	5.46	5.47	5.48	5.49	5.50	5.51	5.52	5.53	5.54	5.55	5.56	5.57	5.58	5.59	5.60
231	5.51	5.52	5.53	5.54	5.55	5.56	5.57	5.58	5.59	5.60	5.61	5.62	5.63	5.64	5.65	5.66	5.67	5.68	5.69	5.70
238	5.61	5.62	5.63	5.64	5.65	5.66	5.67	5.68	5.69	5.70	5.71	5.72	5.73	5.74	5.75	5.76	5.77	5.78	5.79	5.80
245	5.71	5.72	5.73	5.74	5.75	5.76	5.77	5.78	5.79	5.80	5.81	5.82	5.83	5.84	5.85	5.86	5.87	5.88	5.89	5.90
252	5.81	5.82	5.83	5.84	5.85	5.86	5.87	5.88	5.89	5.90	5.91	5.92	5.93	5.94	5.95	5.96	5.97	5.98	5.99	6.00
259	5.91	5.92	5.93	5.94	5.95	5.96	5.97	5.98	5.99	6.00	6.01	6.02	6.03	6.04	6.05	6.06	6.07	6.08	6.09	6.10
266	6.01	6.02	6.03	6.04	6.05	6.06	6.07	6.08	6.09	6.10	6.11	6.12	6.13	6.14	6.15	6.16	6.17	6.18	6.19	6.20
273	6.11	6.12	6.13	6.14	6.15	6.16	6.17	6.18	6.19	6.20	6.21	6.22	6.23	6.24	6.25	6.26	6.27	6.28	6.29	6.30
280	6.21	6.22	6.23	6.24	6.25	6.26	6.27	6.28	6.29	6.30	6.31	6.32	6.33	6.34	6.35	6.36	6.37	6.38	6.39	6.40
287	6.31	6.32	6.33	6.34	6.35	6.36	6.37	6.38	6.39	6.40	6.41	6.42	6.43	6.44	6.45	6.46	6.47	6.48	6.49	6.50
294	6.41	6.42	6.43	6.44	6.45	6.46	6.47	6.48	6.49	6.50	6.51	6.52	6.53	6.54	6.55	6.56	6.57	6.58	6.59	6.60
301	6.51	6.52	6.53	6.54	6.55	6.56	6.57	6.58	6.59	6.60	6.61	6.62	6.63	6.64	6.65	6.66	6.67	6.68	6.69	6.70
308	6.61	6.62	6.63	6.64	6.65	6.66	6.67	6.68	6.69	6.70	6.71	6.72	6.73	6.74	6.75	6.76	6.77	6.78	6.79	6.80
315	6.71	6.72	6.73	6.74	6.75	6.76	6.77	6.78	6.79	6.80	6.81	6.82	6.83	6.84	6.85	6.86	6.87	6.88	6.89	6.90
322	6.81	6.82	6.83	6.84	6.85	6.86	6.87	6.88	6.89	6.90	6.91	6.92	6.93	6.94	6.95	6.96	6.97	6.98	6.99	7.00
329	6.91	6.92	6.93	6.94	6.95	6.96	6.97	6.98	6.99	7.00	7.01	7.02	7.03	7.04	7.05	7.06	7.07	7.08	7.09	7.10
336	7.01	7.02	7.03	7.04	7.05	7.06	7.07	7.08	7.09	7.10	7.11	7.12	7.13	7.14	7.15	7.16	7.17	7.18	7.19	7.20
343	7.11	7.12	7.13	7.14	7.15	7.16	7.17	7.18	7.19	7.20	7.21	7.22	7.23	7.24	7.25	7.26	7.27	7.28	7.29	7.30
350	7.21	7.22	7.23	7.24	7.25	7.26	7.27	7.28	7.29	7.30	7.31	7.32	7.33	7.34	7.35	7.36	7.37	7.38	7.39	7.40

TABLA 78

		ALFA ROMEO S.p.A. - 2017																							
		TABELLA 13																							
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					
		CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40						CEMENTO 80 / PUZOLANA 40					

VIII.3.3.2.- De los Cementos de Mezcla PA y/o PUZ y PUZ: Razones de su preparación y ensayo.

En función de la razón de la hibridación VIII.3.1.4<sup>a</sup>, antes citada se prepararon y ensayaron mediante el método H-1 los cementos de mezcla PA y/o PUZ que se citan a continuación por las siguientes razones:

- (a) Cementos de mezcla PUZ de cemento portland matriz de contenido elevado de  $C_3A$ , caso del P-1, 14,11%  $C_3A$ : En vista de que los resultados obtenidos mediante los anteriores métodos de ensayo L-A y/o ASTM C 452-68 y/o ASTM C 452-75, aplicados a los cementos portland solos y/o con adición de puzolana, apuntan a que, de entre estos últimos, el PUZ 60/40 ha solido mostrar por lo común el mejor comportamiento de los tres hermanos de cada familia, ante el ataque de los iones sulfato, se pensó ensayar expresamente el mismo al objeto de tratar de confirmar una vez más,

- tal hecho, mediante el método H-1, y en su caso,
- el aserto generalizado existente sobre el buen comportamiento ante tal ataque agresivo que la presencia de puzolana(s), en tales proporciones, 40% en peso, suele conferirle, por lo general a un cemento portland; por lo que, según ello, tal cemento de mezcla 60/40 respectivo habrá de ser en todos los casos el que mayor RS posea, aunque no obstante en caso contrario y a través de su contraste, se tratará de clasificar a las puzolanas respectivas constitutivas de aquellos en función de su distinto grado de protección que le pudieran conferir al cemento portland acompañante común de todas ellas.

Por todo lo cual los cementos de mezcla PUZ preparados han sido todos los 60/40 de cemento portland matriz P-1 y puzolana D, E, C, A, C y M, respectivamente.

- (b) Cementos de mezcla PA de cemento portland matriz de contenido prácticamente nulo de  $C_3A$ , caso del PY-4 y el PY-6, 0,00%  $C_3A$ : En este caso se optó por el cemento de mezcla PA 80/20, por todo lo contrario al caso anterior, ya que si a la característica intrínseca contrastada del elevado grado de RS de tales cementos portland PY, se le suma el aún mejor nombre y mayor predicamento, generalizados - aunque no lo suficientemente contrastados -, que en tal sentido nos ha llegado hasta hoy de todas las puzolanas en general, el cemento de mezcla 60/40 correspondiente, y en todos los casos, habría de tener, en teoría y probablemente, un comporta-

miento extraordinario ante el ataque sulfático, mientras que su "hermano" 80/20, si lo tuviese, en su caso, de igual tipo y graduación, sería debido mayormente al influjo en el mismo de la característica propia y contrastada de elevada RS de su fracción PY, 80% en peso, correspondiente. No obstante y en el caso de que ocurriera lo contrario podría decirse con fundamento que tal anomalía, sería achacable a su fracción, 20% en peso, de puzolana-X acompañante respectiva, con lo cual y en su caso podrían clasificarse a las mismas en función de su distinto grado de "influencia negativa" que le confirieran a dicho PY común que las acompaña.

Por todo lo cual los cementos de mezcla PA preparados y así ensayados fueron única y exclusivamente todos los 80/20 de matriz PY-4 ó PY-6 y puzolana D, H, O, A, C y M, respectivamente.

- (c) Cementos de mezcla PA y/o PUZ de cemento portland matriz de mediano o bajo contenido de  $C_3A$ , caso del P-31 (7,52%), P-5 (6,83%) y PY-1 (3,83%): En este caso, al ser los contenidos respectivos de los cementos portland P y PY elegidos, intermedios entre los de los dos casos a) y b) anteriores, los cementos de mezcla con ellos preparados se hicieron en función de su similitud o proximidad relativa a los mismos a) ó b) antes citados, mas para ver la influencia del contenido de  $C_3A$  de cada uno de ellos con cada puzolana, que la de la puzolana en si, puesto que por los casos anteriores a) y b), las mismas quedarían ampliamente contrastadas.

Por otra parte y además, se deseó realizar la comparación a secas de un cemento de mezcla con otro, sin tener en cuenta en absoluto ni su cemento portland ni su puzolana constitutivos del mismo en cada caso (aunque en realidad si se conocieran por la circunstancialidad de este trabajo), por ser este hecho el que más se aproxima a la realidad que como se sabe no es otra que la gran variabilidad, en calidad y cantidad, de cementos de mezcla PA y PUZ industriales existentes en el mercado.

Por todo lo cual se operó del siguiente modo:

- con el cemento portland P-31 se preparó:

- a) Un cemento de mezcla PA 80/20, (P-31/N 80/20), para ver su comportamiento y contraste con sus homónimos correspondientes de matriz P-5 (P-5/N 80/20), PY-4 (PY-4/N 80/20) y PY-6 (PY-6/N 80/20), respectivamente, y todos y cada uno a su vez con la puzolana silícica N, porque amén de su buen compor

tamiento ante el ataque de los iones sulfato (contrastado mediante los métodos L-A y ASTM C 452) será junto con sus afines, las que, en su caso, se utilicen comúnmente en la industria de la construcción y sus derivadas correspondientes del cemento, del hormigón, etc, para de este modo tratar de conocer mediante este método H-1, la posible relación existente, a igualdad de cemento de mezcla 80/20, entre contenido variable de  $C_3A$  del cemento portland matriz y su grado de RS correspondiente; del mismo modo y por lo contrario se trató de conocer el efecto adicional derivado de la variación de puzolana (tipo y cantidad), causa por la cual en el estudio comparativo se incluyeron los cementos de mezcla PY-1/M 80/20 y (P-1/M 60/40), respectivamente.

- b) Un cemento de mezcla PUZ 60/40, para ver su comportamiento y contraste con su homónimo correspondiente de matriz P-1, respectivamente, y cada uno de los dos, a su vez, con la puzolana silícica N, por idénticas razones del caso anterior, o sea (P-1/N 60/40) y (P-31/N 60/40), y
- c) Un cemento de mezcla PUZ 70/30 con puzolana silícica N, para ver su comportamiento y contraste, en su caso, con sus homónimos correspondientes de igual cemento portland matriz P-31 y puzolanas CV-10 y CV-19, respectivamente,
  - con el cemento portland P-5 se preparó un cemento de mezcla PA 80/20 con la puzolana N, (P-5/N 80/20) por la razón (c) a) anterior, y
  - con el cemento portland PY-1 (PY-1/M 80/20), otro tanto por idéntico motivo (c) a) anterior.
- (d) Cementos de mezcla PUZ industriales, ocho, véase Tabla 11: En vista de la variable casuística razonada de cementos de mezcla PA y/o PUZ preparados y ensayados, mediante este método H-1, así como también el comportamiento variable de los mismos como tales sin tener en cuenta ni su cemento portland ni su puzolana constitutiva en cada caso, a través de los métodos L-A y ASTM C 452, se trató de confirmar aquél mediante el ensayo de los ocho cementos PUZ industriales elegidos para este trabajo y ensayados como decimos mediante este método H-1.

VIII.3.3.2.1.- Cementos de Mezcla preparados con Cemento Portland de contenido elevado de  $C_3A$ , el P-1 (14,11% C A) y las Puzolanas D, N, O, A, C y M, respectivamente, 60/40, en peso:

Discusión VIII.3.3.2.1

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$ , véase Tablas 26, 73, 77, 78 y 80

- 1ª.- En todos los cementos de mezcla PUZ preparados y así ensayados, la evolución de los valores del  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$  de sus probetas respectivas, es de,
- aumento gradativo de distinta uniformidad, según el tipo de puzolana, para el  $\bar{\Delta}L$ , y de
  - disminución gradativa ó más o menos sinuosa , según el tipo de puzolana, para la  $Vcl$ , respectivamente, de modo y manera que,
  - si la puzolana es la silícica D ó N,
    - . el  $\bar{\Delta}L$ , es del mismo, y
    - . la  $Vcl$ , es de distinto sentido que los correspondientes a su cemento portland matriz acompañante común P-1 sólo, y
  - si la puzolana es,
    - . la silicoaluminosa, O, A y C, ó
    - . la aluminica, M,
- tanto el  $\bar{\Delta}L$  como la  $Vcl$  son del mismo sentido - aunque el primero uniformemente y el segundo sinuosamente-, y distinta cuantía a igualdad de edad, según la puzolana de que se trate, que los correspondientes a su cemento portland matriz acompañante común (P-1) solo.

No obstante y de todo ello, lo realmente destacable de este parámetro es que la mayor parte del mismo, transcurre por lo general y en todos estos casos durante los primeros 28 días del ensayo y mas concretamente en los primeros 7 días, al contrario de lo que ocurriere con su cemento portland matriz acompañante común (P-1) solo, que lo alcanzó entre los primeros 60 y 90 días de edad de las probetas, aunque por lo demás, fue similar en la forma que no en la cuantía, véase Tabla 73.

- 2ª.- Las clasificaciones obtenidas a las edades fundamentales del ensayo de las puzolanas citadas: D, N, O, A, C y M , así ensayadas y su influencia sobre la RS de su cemento portland



matriz acompañante común (P-1) solo, en función de los valores de  $\bar{\Delta L}$  ó de  $V_{cl}$ , de mayor a menor por este orden, de sus probetas respectivas, han sido las siguientes, véase Tabla 80.

- 3.- En el estudio comparativo de estos cementos de mezcla (P-1/D, N, O, A, C ó M 60/40) ensayados según,
- . el presente método acelerado de ensayo H-1, y
  - . el método acelerado de ensayo ASTM C 452-68,
- se observa como, a igualdad de edad del ensayo y puzolana, por lo general, los valores,
- del parámetro derivado  $\frac{\bar{\Delta L}}{g. \text{ cemento}}$ , son notablemente mayores en este caso del H-1, que en aquél del ASTM C 452-68, excepto en el (P-1/D 60/40) donde tal mayoría se torna en lo contrario a partir precisamente de la edad de 60 días en adelante, mientras que en los valores
  - del parámetro absoluto  $\bar{\Delta L}$  tal mayoría es tanto mas acusada cuanto mas aluminica es la puzolana y cuanto mayor es la edad del ensayo, y viceversa.

#### Discusión VIII.3.3.2.1 (cont.)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta RMF$ ,  $\Delta RMC$ ,  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$ , véase Tablas 42, 43, 44, 81, 28 y 29.

1.- En todos los cementos de mezcla la evolución de los valores de los parámetros RMF, RMC,  $\Delta RMF$  e  $\Delta RMC$  de sus probetas respectivas, ha sido:

- caso de las puzolanas D y N: de aumento progresivo y continuo hasta llegar a la edad final del ensayo, a diferencia de lo que le ocurriere a su cemento portland matriz acompañante (P-1) solo, y
- caso de las puzolanas O, A, C y M: de aumento hasta alcanzar un valor máximo tras el cual disminuye, mas o menos sinuosamente hasta llegar a un valor mínimo coincidente, ó no, con la rotura de sus probetas respectivas, antes, ó no, de la edad final del ensayo; es decir, todas las curvas representativas de sus valores respectivos, adoptan la forma de una campana mas o menos abierta y regular, al igual que le ocurriere a su cemento portland matriz acompañante (P-1) solo.

Y por otra parte, para el caso de los valores de los parámetros  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$ , es de disminución rápida, progresiva y mas o

menos sinuosa hasta la práctica nulidad y/o negatividad de los mismos, siendo por lo común los correspondientes a los primeros 28 días de edad del ensayo y mas concretamente el de la edad de 7 días, los mayores de todos ellos respectivamente, al igual que ocurriere con su cemento portland matriz acompañante (P-1) solo, aunque por lo general de bastante mayor magnitud.

No obstante lo realmente destacable de todas estas puzolanas, D, N, O, A, C y M así ensayadas es:

- a) que las probetas de los cementos de mezcla citados preparados con la puzolana C y M, respectivamente han sido las que mayores  $\Delta RMF$  y  $\Delta RMC$  y consiguientemente  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$  respectivas muestran de todas a la edad de 7 días, y
- b) que el valor máximo de  $\Delta RMF$  e  $\Delta RMC$ , se alcanza tanto mas tarde cuanto mayor es el contenido de  $SiO_2$  de la puzolana ensayada, en este caso la D y N.

Por el contrario y al igual que ocurriere con el cemento matriz acompañante, (P-1) solo, el máximo correspondiente de  $RMF$  e  $RMC$ , se alcanza por lo general, en casi todas las probetas de cada puzolana dos o tres edades antes que los correspondientes a la  $RMC$  e  $\Delta RMC$ , excepto para el caso de las puzolanas D y N que suele ser mas próximas o comunes las edades en cuestión.

2\*.- Las clasificaciones obtenidas a las edades fundamentales del ensayo de 1,7,14,21,28,150,365 y 730 días de las puzolanas citadas así ensayadas, y su influencia en la RM de su cemento portland matriz acompañante común(P-1) solo, en función de los valores de  $RMF$  y  $RMC$  de menor a mayor por este orden de sus probetas respectivas, han sido las siguientes, véase Tabla 81.

Por otra parte, al no haber resultado coincidente en nada los correspondientes a los parámetros  $RMF$  y  $RMC$  y los derivados de ambos, no se ha creído oportuno el exponerlas.

#### Discusión VIII.3.3.2.1 (cont.)

(G) Parámetro: Porosidad, véase Tabla 45 y 28.

1\*.- Las puzolanas D, N, O, A, C y M, se dividen en dos grupos claramente diferenciados por la evolución de la porosidad de sus probetas respectivas a lo largo del ensayo:

- a) uno formado por las puzolanas silíceas D y N, en el que los valores de la porosidad de sus probetas respectivas presentan

una sinuosidad diferente, irregular en la D y mas regular en la M, a diferencia de lo que ocurriere con su cemento portland matriz (P-1) solo, cuya forma es de "campana muy abierta", cuyo valor mínimo es la "base" y su máximos correspondientes, las ramas laterales desiguales de la misma, y

- b) otro formado por el resto de las puzolanas, en el que la porosidad de sus probetas respectivas, y su curva representativa, se asemeja, dentro de lo que cabe, bastante mas a los de su cemento matriz (P-1) sólo, es decir, adopta en cierto modo la forma mas o menos clara de "campana muy abierta mas o menos regular", cuyo valor mínimo,
- a la edad de 7 días, para el caso de las puzolanas C y M, y
  - a la edad de 60 días, para el caso de las puzolanas O y A
- es la base, y sus máximos correspondientes, coincidentes con la autodestrucción de sus probetas antes de finalizar (caso de las puzolanas O y A), ó no, (caso de las puzolanas C y M) el ensayo, son las "ramas laterales", menor o mas desiguales, de la misma.

2\*.- Las clasificaciones obtenidas a las edades fundamentales del ensayo que se citan en la Tabla 82 de las puzolanas citadas así ensayadas pero separadas en dos grupos por las razones apuntadas en la discusión correspondiente anterior y su influencia sobre la porosidad de las probetas de su cemento portland matriz acompañante común (P-1) sólo, en función de los valores de porosidad, de menor a mayor por este orden, han sido las siguientes,

Tabla 82

CLASIFICACION DE LAS PUZOLANAS D y N COMPARADAS ENTRE SI, Y DE LAS PUZOLANAS O, A, C y M, COMPARADAS ENTRE SI, Y RESPECTO DE SU CEMENTO PORTLAND MATRIZ ACOMPAÑANTE RESPECTIVO P-1 (\*) SOLO, EN f (Porosidad) DE MENOR A MAYOR VALOR

Edad	Parámetro	Cementos de mezcla (P-1/Puzolana X 60/40)	
		Puzolanas :	
		D y N	O, A, C y M
14	Porosidad	*N < D	*O < A < C < M
28		*N < D	*O < A < C < M
180		N < D*	O < A < C < M*
365		N < D*	O < C < M < A*
730		N < D*	M < C < O y A*

Discusión VIII.3.3.2.1. (cont.)

(H) : Parámetros: Vu,  $\Delta Vu$  y  $V\Delta Vu$ , véase Tablas 45, 46, 28 y 30

- 1ª.- En todos los cementos de mezcla preparados y así ensayados, la evolución de los valores de Vu de sus probetas respectivas, describe aproximadamente una campana de Gauss, y más o menos abierta, según los casos, cuyo máximo respectivo, correspondiente o no, al fin de la probeta, se consigue a distinta edad, de modo y manera que,
- . para el caso de las puzolanas silícicas D y N, se alcanzó a la edad de 365 días,
  - . para el caso de la puzolana O a la edad de 90 días,
  - . " " " A " " 365 días - fin de la probeta-,
  - . para el caso de la puzolana C a la edad de 730 días, y
  - . " " " M " " 120 días.

Por eso aquellas puzolanas cuyos valores respectivos de sus probetas describen tan sólo la rama ascendente de la curva de Gauss citada, con autodestrucción incluida, se puede decir que en cierto modo se parecen en la forma, que no en la cuantía, a la de su cemento (P-I) solo, pues en todos los casos y edades posibles la Vu de este último ha resultado ser mayor que la de cualquier cemento citado.

- 2ª.- Obsérvese el hecho curioso ocurrido con este tipo de cementos ensayados y comparados de este modo, como existen cementos de mezcla que pese a tener un valor de Vu de sus probetas mayor, las mismas no muestran señal alguna de autodestrucción, caso del (P-I/N 60/40), (P-I/O 60/40) y (P-I/A 60/40) a la edad de 90 días.

Mientras que sus homónimos de puzolana C ó M, mostrarán el mismo o parecido comportamiento que la O ó A anteriores sólo que más tardíamente.

- 3ª.- Las clasificaciones obtenidas a las edades fundamentales del ensayo de las puzolanas citadas así ensayadas (y su influencia sobre la Vu de la probeta de su cemento portland matriz acompañante común (P-I) solo) en función de los valores de Vu de menor a mayor por este orden, de sus probetas respectivas han sido las siguientes, véase Tabla 83,

Tabla 83

CLASIFICACION DE LAS PUZOLANAS D, N, O, A, C y M, COMPARADAS ENTRE SI Y RESPECTO DE SU CEMENTO PORTLAND MATRIZ P-1 (\*) SOLO, EN  $f(Vu)$ , DE MENOR A MAYOR VALOR.

Edad (días)	Parámetro	Cementos de mezcla (P-1/Puzolana X 60/40) Puzolanas D, N, O, A, C y M
14	$<Vu<$	$D < N < A < O < C < M^*$
28		$D < N < A < O < C < M^*$
120		$A < D < O < N < C < M$ ; las del (P-1), Inedibles-Rotas
730		no se pueden comparar

de las cuales se observa que las dos primeras de 14 y 28 días son coincidentes con las obtenidas del AG, ensayo de Fratini, POP, método L-A (40) y método ASTM C 452-68 (4L).

Discusión VIII.3.3.2.1. (cont.)

(I) :  $SO_{41cp}^=$  y  $Vv$ , véase Tablas 47 y 30

1ª.- Las puzolanas D, N, O, A, C y M, se dividen en dos grupos claramente diferenciados por el desarrollo de la  $SO_{41cp}^=$  a lo largo del ensayo, de modo y manera que,

- un grupo formado por las puzolanas silíceas D y N, en las que dicho  $SO_{41cp}^=$  aumenta gradativamente conforme transcurre el ensayo, al igual que ocurriese con su cemento (P-1) solo hasta la edad de 90 días,
- otro grupo, formado por el resto de las puzolanas comparadas, o sea, O, A, C y M, en las que dicho  $SO_{41cp}^=$  tras alcanzar un máximo a la edad de 14 días, disminuye gradativamente conforme transcurre el ensayo a diferencia de lo que ocurriese con su cemento (P-1) solo.

2ª.- Continuando con el punto anterior y al objeto de obtener una(s) clasificación(es) de las mismas mediante este parámetro al igual que ocurriese con los anteriores, en este caso se tendrían que obtener dos clasificaciones por separado:

- a) una formada por las puzolanas silíceas D y N de modo y manera que a igualdad de edad, la cantidad de  $SO_{41cp}^=$  de la puzolana D es mayor que la de los de la N.

$\text{SO}_4^=$	$\text{lcp}$	$\text{P-1/D } 60/40$	$\text{P-1/N } 60/40$
-----------------	--------------	-----------------------	-----------------------

b) otra formada por el resto de las puzolanas ensayadas de modo y manera que a igualdad de edad el  $\text{SO}_4^=$  de los líquidos de conservación de las probetas preparadas con la puzolana 0 es mayor que la de las A, ésta mayor que la de las C y ésta mayor que la de las M, es decir,

$\text{SO}_4^=$	$\text{lcp}$	$\text{P-1/O } 60/40$	$\text{P-1/A } 60/40$	$\text{P-1/C } 60/40$	$\text{P-1/M } 60/40$
-----------------	--------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

c) y finalmente otra formada por las otras dos anteriores de forma que desde la edad de 120 días hasta la edad final del ensayo se cumple que,

$\text{SO}_4^=$	$\text{lcp}$	$\text{P-1/D } 60/40$	$\text{P-1/N } 60/40$	$\text{P-1/O } 60/40$	$\text{P-1/A } 60/40$	$\text{P-1/C } 60/40$	$\text{P-1/M } 60/40$
						desde	
						120 días a	
						730 días	

lo cual coincide con la obtenida mediante AQ, ensayo de Fratini, POP, método L-A y método ASTM C 452-62.

#### Interpretación VIII.3.3.2.1 (E)(F)(I)

Evidentemente todo ello es la confirmación una vez mas, del distinto carácter y por tanto diferente comportamiento, de las puzolanas comparadas D, N, O, A, C y M, así ensayadas, por cuyo motivo se puede decir con fundamento que según este método de ensayo N-1,

- las puzolanas D y N han de ser silícicas, por su actividad puzolánica "anti-sulfato", la cual ha sido la causa y origen de los buenos resultados obtenidos de nuevo con las mismas- aunque éstos, en relación a los de su cemento portland matriz acompañante común (P-1) solo, hayan resultado ser aquí algo inferiores que los obtenidos en igual caso en el ensayo L-A-, al igual que ocurriese con los correspondientes al ensayo ASTM C 452-62, por la misma razón apuntada en aquella ocasión, o sea, la VIII.2.2.2.1,(E)1º; pues si las probetas del cemento portland (P-1) solo, se auto-destruyen, las del (P-1/D 60/40) y las del (P-1/N 60/40), con mas razón se tendrían que auto-destruir, en el supuesto falso de que las puzolanas D y N únicamente actuasen como un INEPTO<sub>RS</sub>, ya que en ambos casos, para igual cantidad de fracción (P-1), o sea,

9,466% de  $C_3A$ , se tendría mayor disponibilidad del  $SO_3$  agresivo, dado que  $\frac{15,50\% SO_3}{8,466\% C_3A} > \frac{15,50\% SO_3}{12,11\% C_3A}$ ; luego con mayor razón, como decimos, y mas rápidamente quizás, se destruirían las probetas de aquellos (P-1/D 60/40) y (P-1/N 60/40), que las del cemento (P-1) solo. ¡Y eso no ha ocurrido, sino todo lo contrario! Por tanto ello ha de deberse una vez mas a la acción puzolánica tan característica ó "anti-sulfato" de dichas puzolanas D y N; por el contrario,

- el resto de las puzolanas O, A, C y M así ensayadas y comparadas deben de ser, ó sílico-aluminosas ó alumino-silícicas ó aluminicas, dado que en el mejor de los casos, puzolana C, no se logra disminuir finalmente la RS del cemento portland (P-1) solo. como lo hacen la D y N anteriores; pues según la especificación propuesta en la interp.VIII.3.3.1 el cemento FUZ correspondiente (P-1/C 60/40) continúa siendo de "no elevada RS", al igual que el (P-1) solo; y ello ha de deberse en todos los casos a la misma razón ya apuntada en la conclusión VII.4.2.3\* (POP), es decir, a la  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana, pues al existir en este caso mayor cantidad de  $SO_3$ , 21,0%, que en sus homónimos anteriores, L-A (15,50%  $SO_3$ ) y ASTM C 452 (7,0%  $SO_3$ ), podrá participar de aquél, 21,0% inicial, mas y mejor, tanto la  $Al_2O_3^{r-}$  de la fracción puzolana, O, A, C ó M, como el  $C_3A$  de la fracción del (P-1) que la acompaña -según las interpretaciones VIII.2.2.2.3 (E)(F), parte inicial de la 2ª y final de la 3ª- el cual al ser constante en todos los cementos de mezcla PUZ 60/40 citados, deberá de originar igual cantidad total de etf-if, por ello también constante en todos ellos; por lo que las discrepancias habidas entre los valores de  $\bar{A}_L$  y  $V_{cl}$  de sus probetas respectivas, habrán de ser forzosamente imputadas a la fracción puzolana, O, A, C ó M, en cada caso, o mejor a su componente común en todas ellas, la  $Al_2O_3^{r-}$ , distinto en cantidad de una a otra, lo cual concuerda con lo dicho al respecto en la conclusión parcial VII.4.2.3\* (POP). Y el modo y manera de actuar en este caso dicha  $Al_2O_3^{r-}$  respectiva deberá ser que en tanto en cuanto menos cantidad de la misma posea la puzolana ensayada, mas  $SO_3$ , del 21,0% inicial, deberá dejar (véase Tabla 47 de  $SO_4^{=}$  lcp que así nos lo confirma) para ser fijada con posterioridad, y una vez fraguada(s) la(s) probeta(s), por su fracción de  $C_3A$  del cemento P-1 acompañante común de todas ellas, con las consecuencias expansoras nocivas pertinentes, y viceversa. De aquí que hayan sido los cementos de

mezcla (P-1/C 60/40) y (P-1/M 60/40), los que paradójicamente mejor se hayan portado en este ensayo, por lo que ambas puzolanas constitutivas de los mismos deban de ser las que mayor cantidad de  $Al_2O_3^{r-}$  posean, de todas las aquí comparadas. No obstante y según todo ello el (P-1/M 60/40) se debería haber portado mejor que el (P-1/C 60/40) y no al contrario como ha ocurrido en la realidad y en el método L-A, que no en el ASTM C 452-68, por lo que ello ha de ser debido a alguna(s) de las causas que se exponen al efecto mas adelante y que hacen referencia a la acción sinérgica y/o al mayor contenido de  $Na_2O$  (%) +  $K_2O$  (%) de la puzolana C sobre la M y sus posibles consecuencias pertinentes en la cantidad a formar de ett-total en cada caso.

Por otra parte, y respecto a las puzolanas C y A, todo parece apuntar una vez mas, a que esta última deberá poseer un contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  algo mayor que la primera, pues teniendo en cuenta el estudio comparativo de las mismas junto con la C y la M, así ensayadas se puede observar mejor como,

- al ser constante la cantidad de ett-lf en todas sus probetas respectivas, y

- ser igualmente la Vf de la ett-rf mayor que la Vf de la ett-lf, lógicamente los valores del  $\bar{A}L$  de las mismas a las edades iniciales del ensayo, y a mas iniciales mejor, habrán de ser adscribibles forzosamente al contenido relativo de  $Al_2O_3^{r-}$  aportado por cada una de ellas -el cual, circunstancialmente, ha resultado ser proporcional a su contenido absoluto correspondiente, véase Tabla 11-, más que al  $C_3A$  de la fracción constante del (P-1) que la acompaña, o al menos, a la acción sinérgica correspondiente, que según las interpretaciones VII.1.2.2.2. (L-A) y la interpretación VIII.2.2.2.7 (ASTM C 452) anteriores, (ó máximos valores de  $\bar{A}L$ , RMF e RMC a 7 días) deberá ser adscrito a las probetas del cemento de mezcla (P-1/M 60/40), mas que a ningunas otras, dado que en ellas el cociente  $\frac{Al_2O_3^{r-}(\%)}{C_3A(\%)}$  debe ser el

de máxima disponibilidad de  $Al_2O_3^{r-}$  y mínima, sin ser nula, de  $C_3A$ ; mientras que el menor y por todo lo contrario, a las del (P-1/O 80/20) como así ha ocurrido en este trabajo; por ello al ser aquél algo mayor en las del (P-1/A 60/40), ésta puzolana deberá poseer un ligero mayor contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  que la O.

De aquí que,

- Por un lado, las probetas del cemento (P-1/A 80/20) originen, de un principio, un valor del  $\bar{A}L$  y porosidad lo suficientemente



superior (y al contrario en el resto de los parámetros) a las del (P-1/C 80/20) como para no poder ser superado ni alcanzado, con posterioridad, por las de este último, pese a que las mismas posean una probable mayor disponibilidad de  $\text{SO}_3$  y  $\text{C}_3\text{A}$  residuales, para que, en teoría ocurriera (y quizás en la práctica, si tales probetas no se hubiesen auto-destruido antes del tiempo necesario para tal fin). Por lo que al no ser tales contenidos respectivos de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  muy dispares, aunque si diferentes, y no serlo por lo tanto tampoco sus  $\text{SO}_3$  y  $\text{C}_3\text{A}$  respectivos, lógicamente antes se tendrán que auto-destruir aquellas probetas que mayor  $\Delta\bar{L}$  portaban, en este caso las del (P-1/A 80/20), como así ha ocurrido en este trabajo; sin olvidar tampoco la probable razón adicional apuntada en la interpretación VII.4.1.2.2\* (PCP) y en la interpretación VIII.1.2.2.3 (E) 4\* B) (L-A), referente a que si bien la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la puzolana A pudiera ser menor que la de la puzolana O, al contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  ó mejor  $\text{Al}^{3+}$  de origen pseudo-cristalino, mejor vítreo de baja energía de formación y lenta pero progresivamente lixiviable por la reserva portlandítica apropiada para tal fin (de origen PY-4 ó PY-6 preferentemente), no le debe ocurrir otro tanto, sino todo lo contrario quizás, y

- por otro lado, el que las probetas del (P-1/C 80/20) originen, de principio, un valor del  $\Delta\bar{L}$  de sus probetas, lógicamente inferior a las de las del (P-1/M 80/20), pero sin llegar a destruirse durante todo el ensayo, como en teoría debieran, y mas pronto que las del (P-1/M 80/20) según el razonamiento anterior, parece ser debido,
- o bien, al mayor contenido de alcalinos,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , de la puzolana C sobre la M (ya referido en la interpretación VI.1.2.1.2.1\*(c), Agrupación G, y conclusión VI.1.2.1.2.1\*(c), 3\* (Fratinis), y en la interpretación VIII.1.2.2.3 (E), 4\*(b).1.4 (L-A)), el cual haría que, a igualdad de edad de ensayo, la cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  del líquido de conservación de aquella deba ser algo inferior a las de ésta, y las cantidades de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{CH}^-$ , y  $\text{SO}_4^{=}$ , también, protegiéndolas por tanto de su auto-destrucción selenitosa, siendo quizás esta causa probable, a tenor de los valores de  $\text{SO}_4^{=}$  lcp de la puzolana C; los cuales, si bien son superiores a los de la M, son también inferiores a los de la A, véase Tabla 47, no debiendo serlo en el caso de que los contenidos

de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{F-}}$  de ambas puzolanas A y C fueran muy próximos, pues los citados mayores contenidos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  de esta última sobre aquella lo impedirían por la razón anterior. De aquí que ello pueda ser también el motivo de que las probetas de la puzolana O se auto-destruyan algo mas tardíamente que las de la A, pese a que teóricamente debiera ocurrir lo contrario, pues la O posee un contenido total de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  expresados como  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , apreciablemente mayor que la A, 5,52% contra 1,68%, respectivamente, y otro tanto quizás puede que haya ocurrido con la puzolana CV-10 respecto de la CV-19, pues el contenido de alcalinos respectivos está a favor de la CV-10, o sea, 4,1% contra 3,0%, véase Tabla 11.

- o bien, a la mayor acción sinérgica en las del (P-1/M 80/20) que provoca una mayor velocidad de fraguado y endurecimiento de las mismas con probable aprisionamiento de parte del  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{F-}}$  y  $\text{C}_3\text{A}$  de cada fracción puzolana X y cemento P-1 (mayormente de este último), respectivamente, que con posterioridad, convertidos en residuales, originarían la auto-destrucción de sus probetas (hecho éste muy probable puesto que los valores de  $\bar{\Delta}\text{L}$ , RMF y RMC y Vu de las probetas del (P-1/M 80/20) son mayores que los del (P-1/C 80/20) durante los 730 días de duración del ensayo) (el resto de los parámetros menores, véanse Tablas 77 y 78), lo cual es demostrativo del efecto expansivo-colamante de la ettringita en especial y a edades iniciales la ett-rf 1<sup>ria</sup>; además dicha mayor acción sinérgica deberá haber originado un rápido,
  - . aumento del  $\bar{\Delta}\text{L}$ , RMF, RMC y Vu, y
  - . disminución de la porosidad (al menos solo de 7 a 14 días) y  $\text{SO}_4^=$  lcp
 como así ha ocurrido en ambos (P-1/C 80/20) y (P-1/M 80/20) en este trabajo; debiendo de ocurrir todo lo contrario por menor acción sinérgica en los cementos de mezcla homónimos correspondientes de las puzolanas O y A, como así también ha ocurrido en este trabajo. Esta acción sinérgica o potenciación de efectos ó valor máximo de Vcl ocurrido en mayor o menor medida a la edad inicial de 7 días en todos los casos—a diferencia con la de su cemento portland matriz acompañante común (P-1) solo—, se puede decir que se ha de deber a que en todos los cementos de

mezcla FUZ citados se dan conjuntamente a tal edad la  $v_{cl}$  -en distinta cuantía de una puzolana a otra-, y la  $v_{cl}$  -relativamente constante en todos los casos-. De aquí que a tal edad la  $v_{cl}$  sea mayor, debiendo descender conforme transcurre el ensayo tanto mas drásticamente cuanto mayor haya sido la acción sinérgica o sea el valor de  $v_{cl}$  alcanzado, es decir, cuanto mayor sea el contenido de  $Al_2O_3^r$  de la puzolana, en este caso la M, como así ha ocurrido en esta parte del trabajo y en la siguiente homónima de cemento portland matriz acompañante PY-4 ó PY-6, aunque lógicamente en menor medida por ausencia casi total de acción sinérgica, al no aportar prácticamente  $C_3A$  alguno tales cementos. Por otra parte y del mismo modo también se puede observar la relativa proximidad de la puzolana O -dado su comportamiento como inerte- a las silíceas D y N pese a su conocido "parentesco" con el resto A, C y M. Y otro tanto se podría decir de la M, pero a la inversa o sea, emparentada con la D.

- o bien, a ambas causas anteriores en mayor o menor medida.

En cuanto al mayor valor de la  $v_{cl}$  respecto al correspondiente del cemento portland matriz (P-1) solo, alcanzado en el caso de la puzolana D a la edad de 7 días en su cemento de mezcla (P-1/D 60/40), se puede decir que el mismo no puede ser achacable a acción sinérgica alguna, pues el contenido de  $Al_2O_3^r$  de la D debe ser muy escaso lo cual imposibilita que se produzca; en cambio si podría deberse a la misma causa por la que la  $v_{cl}$  P-1/D 80/20 ó 70/30 ó 60/40 relación  $\frac{a}{c} = d$  es mayor a tal edad que la  $v_{cl}$  P-1/D 80/20 ó 70/30 ó 60/40 relación  $\frac{a}{c} = c$ , es decir, a una mayor hidratación en este caso del  $C_3A$  de la fracción cemento portland matriz P-1 que la acompaña, dada la mayor porosidad de este mortero que la del tradicional del (P-1) solo (véase valores de porosidad correspondientes, Tabla 28) por la presencia de dicha puzolana D; todo lo cual haría que la hidratación selenitosa inicial de sus componentes mineralógicos deba de ser mayor en este caso que el del mortero tradicional del (P-1) solo, como así parece haber ocurrido por los resultados obtenidos.

Por tanto y en definitiva, la mayoría mostrada por los valores de los parámetros  $\bar{\Delta L}$ , Vcl e  $\frac{\bar{\Delta L}}{\text{g. cemento}}$ , en este método de ensayo H-1 sobre aquél, ASTM C 452-68, viene a indicar que en el primero, el H-1,

- se debe de estar mas próximo a la estequiometría de la formación de la ettringita total de cada caso, y/o al menos, que,
- la misma respectiva, produce en éste, H-1, mayor acción sinérgica que en aquél, ASTM C 452-68.

De todo lo cual se deduce una vez mas y mediante este método de ensayo H-1 el distinto comportamiento notable en ocasiones, ante el ataque de los iones sulfato, de una a otra puzolana comparada, y aprovechable quizás para una posible futura clasificación de todas ellas ó cualquier otro grupo en función del mismo, con las consecuencias tecnológicas pertinentes del uso mas adecuado de cada una. No obstante lo realmente destacable de todo ello, es la mayoría general mostrada por los valores de los parámetros  $\bar{\Delta L}$ , Vcl e  $\frac{\bar{\Delta L}}{\text{g. cemento}}$ , citada anteriormente, la cual por lo general, es mayor y mas clara aún que la mostrada en igual caso comparativo por los 12 cementos portland, 6 P y 6 PY, anteriores, lo cual redunda en defensa y justificación de aquél, H-1, mas que de este, ASTM C 452-68, máxime si adicionalmente posee la ventaja, al igual que éste, de

que el valor máximo del parámetro Vcl se alcance en todos los casos durante los primeros 28 días de edad de las probetas. Todo lo cual demuestra la posibilidad real de catalogación de este método de ensayo H-1 al rango de acelerado o mejor auto-acelerado,

- por la acción sinérgica inicial no palpable espectacular y drásticamente por estar poco fraguado y endurecido el sistema, en el que la ettringita haría de "fulminante", (de lo que se hablará mas adelante), y
- por la propia auto-aceleración que se le produce durante el transcurso del mismo,

así como la de su aplicación adicional a los cementos de mezcla PA y PUZ y/o a la(s) puzolana(s) que los constituyen respectivamente, para su calificación y cualificación correspondiente para un objetivo dado, al igual que ocurriera con el L-A y ASTM C 452 vistos anteriormente, sin mas que proveerles de una especificación adecuada para tal fin.

Interpretación VIII.3.3.2.1 (G)(H)

De la Discusión 1ª a) y 2ª: El hecho de la colmatación inicial ocurrida en ambos casos y a distintas edades, rápida en la D y mas lenta en la N, probablemente sea debido a que la reactividad de la  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  de ésta última sea mayor que la de aquella y consiguientemente sus geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2^{\text{r-}}}$  sean a tales edades iniciales mas apropiados para impedir y frenar la formación de etf-1f de su fracción cemento portland matriz P-1 constitutiva. No obstante y pese a que en ambas la relación C/S sea la mas apropiada - según se desprende de las interpretaciones correspondientes del método ASTM C 452 aplicado a estos cementos de mezcla -, no llega a impedir hasta anular, los efectos derivados de la formación de aquella, la cual, aunque mas lentamente que en aquél (P-1) sólo, seguirá su proceso formativo. Por lo que tras la consecución del valor mínimo de porosidad anterior respectivo, se producirá el aumento correspondiente hasta la finalización de su formación en ambos casos, a partir del cual sus probetas respectivas se deberán ir colmatando, pero ya mas lentamente al igual que ocurriera en el caso del 7,0% de  $\text{SO}_3$  y por idéntico ó similar motivo. Ello además se ve confirmado por el hecho de que en el caso del cemento (P-1/D 8C/20), su segundo máximo de porosidad, a la edad de 14 días, se alcanza inmediatamente después del mínimo anterior, lo cual da a entender que tal puzolana está mostrando una actividad puzolánica inferior y mas lenta (o sea, geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2^{\text{r-}}}$  de inferior "calidad"), que la N, como ya se confirmó mediante el ensayo de Fratini. Por lo tanto todo ello es una prueba mas de las diferencias físico-químicas notables existentes entre ambas puzolanas D y N como ya se confirmare por A.Q.Fratinis y ASTM C 452 ( $\bar{\Delta L}$ ).

Finalmente el hecho de que al resto de la edades del ensayo la puzolana N colmata mas en general que la D pese a tener un menor contenido de  $\text{SiO}_2$  puede deberse, - o bien a la fracción "calcita" que acompaña a esta puzolana,

- o bien a que esta puzolana posee mas  $Al_2O_3^{r-}$  que la D (pese a lo escaso del contenido de  $Al_2O_3$  de ambas), la cual obviamente podrá dar mas ett-rf colmatante dada su gran velocidad de formación y la lenta velocidad de fraguado y endurecimiento de estos sistemas tan selenitosos,
- o bien a la propia estructura física de la puzolana N mas porosa quizás que la D, lo cual facilitaría mas y mejor su colmatación por ett-lf,
- o bien a todos ó sólo alguno(s) de los anteriores en mayor o menor medida.

De la Discusión 1ª b): El hecho de que hayan tenido que ser las probetas preparadas con las puzolanas C y M las que mas rápida y prontamente se colmaten, no ocurriendo lo mismo con el resto, evidencia que la causa de tal colmatación a tal edad de 7 días, no reside tanto en la fracción de cemento portland matriz P-1 que las acompaña, cuanto más en la fracción puzolana C ó M respectiva, lo cual unido a las conclusiones correspondientes obtenidas de las mismas,

- a) en su A. Q.,
- b) en el ensayo de Fratini,
- c) en la PCP,
- d) en el método L-A, y
- e) en el método ASTM C 452 ( $\Delta L$ ).

viene a confirmar una vez mas que ambas poseen mas  $Al_2O_3^{r-}$  que el resto O y A, pudiendo formar por ello mas ett-rf ria. y colmatante además de expansora a las edades iniciales del ensayo, según ha ocurrido en este trabajo.

Viéndose todo ello confirmado por el hecho de las escasas diferencias habidas, por tal motivo, entre ambas, tanto en colmatación y su inversa, a todas las edades del ensayo.

No obstante la mayor porosidad de las mismas respecto a la O y A durante el resto de las edades del ensayo, después de la de 7 días, puede deberse al mismo hecho aducido en la parte correspondiente de la interpretación (E) y (F) anterior.

Y respecto de los valores del parámetro porosidad y las clasificaciones correspondientes obtenidas mediante los mismos se puede confirmar como las puzolanas que mayor contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  deben poseer, caso de la M y C, mayor formación de ett-rf ria. expansiva y colmatante han debido originar, auto-protegiéndolas por mucho mas

tiempo de tan severísimo ataque agresivo que a la A y C por este orden, como así ha ocurrido en este trabajo al auto-destruirse antes que las probetas de aquellas.

Y por último, al ser coincidente la clasificación obtenida de las puzolanas O, A, C y M ensayadas y comparadas mediante estos parámetros, en especial el  $\Delta\bar{L}$  y a las edades iniciales del ensayo, con la obtenida,

- a) del A.Q.,
- b) del ensayo de Fratini,
- c) de la POP,
- d) del método L-A, y
- e) del método ASTM C 452

ello prueba una vez mas que el contenido relativo de  $Al_2O_3^{r-}$  de cada una de ellas debe de guardar la idéntica relación que la obtenida de las mismas en la conclusión VII.4.2,3\* (POP),

VIII.3.3.2.2.- Cementos de Mezcla preparados con Cemento Portland de contenido prácticamente nulo de  $C_3A$ , el PY-4 y el PY-6, respectivamente, y cada una de las Puzolanas siguientes D, N, O, A, C ó M, 80/20, en peso.

Discusión VIII.3.3.2.2

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$ , véase Tablas 56,80, 87 y 26

1ª.- En todos los cementos de mezcla PA preparados y así ensayados, la creación, evolución y desarrollo de los valores del  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  de sus probetas respectivas, ocurre aproximadamente otro tanto a como ocurriere en el caso anterior VIII.3.3.2.1, con la única diferencia en los valores del  $V_{cl}$ , que en este caso son también del mismo sentido que los correspondientes a su cemento portland matriz acompañante común respectivo (PY-4) ó (PY-6), excepto los correspondientes obtenidos de la puzolana M, que son en forma de campana invertida, a diferencia de los del resto de las puzolanas, que son, claro está, de sinuosidad diferente, entre si, y respecto a los homónimos de cemento portland matriz acompañante común (P-1).

No obstante y en cualquier caso, lo realmente destacable de este parámetro es que la mayor parte de los valores del mismo, se alcanzan por lo genral en todos los cementos de mezcla citados ensayados durante los primeros 28 días de edad de las probetas, al igual que ocurriere con su cemento portland matriz acompañante común (PY-4) ó (PY-6), respectivo, véase Tabla 56, menos en el caso citado de la puzolana M.

2ª.- Vale aquí íntegramente las discusiones VIII.3.3.2.1, 2ª y 3ª anteriores. Y las clasificaciones correspondientes resultantes se encuentran también en la Tabla 80.

3ª.- Por lo general a igualda de edad y puzolana se verifica que los valores del  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  de las probetas de los cementos de mezcla PA 80/20

- de las puzolanas D y N con el cemento portland matriz acompañante PY-4 son mayores hasta la edad de 28 días, y menores desde dicha edad hasta el final del ensayo, que los correspondientes al PY-6,
- de la puzolana O, son prácticamente iguales en ambos casos,
- de las puzolanas A, C y M, son mayores los del PY-4 que los del PY-6, aumentando tal mayoría con el carácter aluminico de la puzolana.



Discusión VIII.3.3.2 (cont.)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta$ RMF,  $\Delta$ RMC, Vc $\Delta$ RMF y Vc $\Delta$ RMC, véase Tablas 58, 60, 62, 81, 28 y 29

1ª.- Sea cual fuese el cemento de mezcla de los citados así ensayados, la creación, evolución y desarrollo de los valores de los parámetros RMF, RMC,  $\Delta$ RMF e  $\Delta$ RMC, de sus probetas respectivas, ha sido:

- caso de las puzolanas D y N: de aumento progresivo y continuado hasta llegar a la edad final del ensayo, al igual que ocurriere con su cemento portland matriz acompañante correspondiente (PY-4) ó (PY-6) solo, aunque en menor cuantía los parámetros absolutos.
- caso de las puzolanas O, A, C y M: de aumento progresivo y continuado hasta alcanzar un valor máximo a una edad dada, variable de uno a otro, tras el cual se produce el descenso correspondiente hasta la rotura, o no, de la probeta; no obstante lo que si se ha de destacar en este caso es que las clasificaciones que se obtendrían de las puzolanas así ensayadas en función de la edad en que alcanzan sus probetas correspondientes su valor máximo RMF y RMC respectivo, serían, de más tarde a más pronto por este orden, y todo ello respecto a las de sus cementos matrices (PY-4) ó (PY-6) solos respectivos, las siguientes:

Edad consecución valor máximo RM (días)	(PY-4)=(PY-4/D 80/20)>(PY-4/M 80/20)>(PY-4/O 80/20)>(PY-4/A 80/20)>(PY-4/C 80/20)>(PY-4/N 80/20) en RMF
	730 d. = 730 d. = 730 d. > 365 d. > 180 d. > 120 d. > 90 d.
	(PY-6)=(PY-6/D 80/20)>(PY-6/M 80/20)>(PY-6/O 80/20)>(PY-6/A 80/20)>(PY-6/C 80/20)>(PY-6/N 80/20) en RMF
	730 d. = 730 d. = 730 d. > 365 d. > 180 d. > 120 d. > 90 d.
	(PY-4)=(PY-4/D 80/20)>(PY-4/M 80/20)>(PY-4/O 80/20)>(PY-4/A 80/20)>(PY-4/N 80/20)>(PY-4/C 80/20) en RMC
730 d. = 730 d. = 730 d. > 365 d. > 180 d. > 150 d. > 120 d.	(PY-6)=(PY-6/D 80/20)>(PY-6/M 80/20)>(PY-6/O 80/20)>(PY-6/A 80/20)>(PY-6/C 80/20)>(PY-6/N 80/20) en RMC
	730 d. = 730 d. = 730 d. > 365 d. > 180 d. > 120 d. > 90 d.

Nota .- 730 d. = Fin ensayo

las cuales se corresponderían prácticamente con las de sus parámetros derivados  $\Delta$ RMF e  $\Delta$ RMC.

Por el contrario en los parámetros Vc $\Delta$ RMF y Vc $\Delta$ RMC, ha sido de disminución rápida, progresiva y más o menos sinuosa hasta la práctica nulidad y negatividad o no de los mismos, siendo por lo común los valores de aquellos, alcanzados en los primeros 28 días de edad del ensayo, y más concretamente el de

la edad de 7 días, las mayores de todos los de cada uno respectivamente, al igual que ocurriere con sus cementos matrices (PY-4) y (PY-6) solos, pero en distinta cuantía, siendo realmente lo destacable de entre todos que lógicamente los correspondientes a las puzolanas C y M hayan sido los mayores de todos ellos.

- 2ª.- Las clasificaciones que se obtienen a las edades fundamentales del ensayo de 7, 14, 28, 365 y 730 días de las puzolanas citadas así ensayadas (y su influencia sobre la RM de su cemento portland matriz acompañante común (PY-4) ó (PY-6) solo), en función de los valores de RMF y RMC, de sus probetas respectivas, de menor a mayor por este orden, han sido las siguientes, véase Tabla 81, y siendo ambas bastante coincidentes con las que se obtendrían en función de los incrementos correspondientes no siéndolo tanto por el contrario con las que se obtendrían con sus parámetros  $V_{c4RMF}$  y/o  $V_{c4RMC}$  respectivas, por lo que por distinto motivo pero igual fin se ha creído innecesario el exponerlas.

Discusión VIII.3.3.2.2. (cont.)

(G) Parámetro : Porosidad, véanse Tablas 64 , 82 y 28

- 1ª.- Repetir aquí íntegramente lo dicho inicialmente en la 1ª discusión del caso anterior (a),

- a) uno formado por las puzolanas silíceas D, N y O en el que los valores de la porosidad de sus respectivas probetas aún siendo de distinto orden de magnitud entre sí, la D y N respecto a la O, van disminuyendo sinuosamente desde el origen, hasta el final del ensayo (señal de colmatación progresiva) no llegándose a destruir dichas probetas durante el mismo, del mismo modo, aunque distinta sinuosidad, que ocurriere con los correspondientes a su cemento (PY-4) ó (PY-6), respectivamente, solo,
- b) otro formado por el resto de las puzolanas así ensayadas y comparadas, A, C y M, en el que sus probetas respectivas y su curva representativa, se asemeja tanto mas a una "campana invertida" cuanto menor debe ser el contenido de  $Al_2O_3$  de la puzolana, de tal modo que para el caso de la puzolana M, que es al parecer la de mayor contenido, con el cemento matriz PY-4, que no con el PY-6, una de las ramas laterales no existe y la creación, evolución y desarrollo de los valores de la porosidad de sus probetas respectivas sólo es de aumento progresivo desde el origen hasta el final del ensayo.

2º.- Las clasificaciones obtenidas a las edades fundamentales del ensayo de 7,14,28,365 y 730 días de las puzolanas citadas así ensayadas, pero separadas en dos grupos por las razones apuntadas en las discusiones correspondientes anteriores (y su influencia sobre la porosidad de las probetas de su cemento portland matriz acompañante común PY-4 ó PY-6 respectivamente, sólo) en función de los valores de porosidad de menor a mayor por este orden, han sido las siguientes, véase Tabla 82,

Tabla 82

Edad	Parámetro Porosidad(%)	Cementos de mezcla:			
		(PY-4/Puzolana X 80/20)		(PY-6/Puzolana X 80/20)	
		D y N	O, A, C y M	D y N	O, A, C y M
14	<	*N < D	O* < A < *C M	*N < D	C < O < A < M
28		*N < D	*A < O < C < M	*N < D	O < C < A < M
365		*N < D	*A < O < C < M	*N < D	A < O < C < M
730		*N < D	*A < O < C < M	*N < D	A < O < C < M

Discusión VIII.3.3.2.2 (cont.)

(H) Parámetros: Vu, ΔVu y VΔvu, véase Tablas 64, 66 83 y 28

1º.- En todos los cementos de mezcla PA preparados y así ensayados, la creación, evolución y desarrollo de los valores de Vu de sus probetas respectivas es el de una campana de Gauss, entera ó no, y mas o menos abierta según los casos, cuyo máximo valor respectivo, se consigue a distinta edad y tanto mas pronto conforme mas aluminica sea la puzolana. De modo y manera que en función de dicha edad de consecución del máximo respectivo, de mas tarde a mas pronto, la clasificación que se obtiene es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 & \text{(PY-4) ó (PY-6) =} \\
 & = (\text{PY-4 ó PY-6/D } 60/40) > (\text{PY-4 ó PY-6/N } 60/40) > (\text{PY-4 ó PY-6/O } 60/40) = (\text{PY-4 ó PY-6/A } 60/40) = (\text{PY-4 ó PY-6/C } 60/40) > (\text{PY-4 ó PY-6/M } 60/40) \\
 & \quad \quad \quad 730 \text{ días} \quad \quad \quad 365 \text{ días} \quad \quad \quad 180 \text{ d.} \\
 & \quad \quad \quad 180 \text{ días} \quad \quad \quad 180 \text{ días} \quad \quad \quad 180 \text{ días} \\
 & > (\text{PY-4 ó PY-6/M } 60/40) \\
 & \quad \quad \quad 60 \text{ días}
 \end{aligned}$$

siendo en cualquier caso las de los cementos (PY-4) ó (PY-6), solos,

- mayores, a todas las edades del ensayo, que las correspondientes a los de mezcla respectivos preparados con las puzolanas D ó N.
- de igual o parecido orden de magnitud que los correspondientes a los de mezcla respectivos preparados con el resto de las puzolanas O, A, C ó M.

2ª.- Las clasificaciones obtenidas a las edades fundamentales del ensayo de 14, 28, 365 y 730 días de las puzolanas así ensayadas (y su influencia sobre la Vu de las probetas de sus cementos portland matrices acompañantes respectivos (PY-4) ó (PY-6) solos), en función de los valores de Vu de sus probetas respectivas, de menor a mayor valor por este orden, de sus probetas respectivas, han sido las siguientes, véase Tabla 83,

Tabla 83

EDAD (días)	Parámetro	Cementos de mezcla: PY-4 ó PY-6/D,N,O,A,C ó M 80/20
14	< Vu <	$D < N^* < C < A < O < M$
28		$D < N^* < A < C < M < O$
365		$O < A < C = D^* < N < M$
730		$C < A < N < O < D^* < M$

Discusión VIII.3.3.2.2 (cont.)

(I) Parámetros:  $SO_4^{=}$  lcp y Vv, véase Tabla 69 y 30

1ª.- En este caso ocurre otro tanto a lo dicho para el caso anterior y también en su comparación con los cementos (PY-4) ó (PY-6) respectivamente, solos, aunque claro está con valores distintos mayores en el presente, puesto que al ser los cementos PY-4 y PY-6 de nulo contenido de  $C_3A$ , el consumo de  $SO_3$  puesto como agresivo habrá de ser menor, y por tanto la posibilidad de solubilizarse en mayor cantidad por mayor presencia de soluto será obviamente mayor.

2ª.- En el estudio comparativo de las puzolanas así ensayadas a través de los valores de este parámetro  $SO_4^{=}$  lcp, se observa como se ha de realizar por separado en dos grupos bien distintos, por las razones afines apuntadas en el parámetro porosidad,

- el grupo de las puzolanas silíceas D y N, donde se obtiene la clasificación siguiente

$$< SO_4^{=} \text{ lcp} < : (PY-4/D \text{ ó } N \text{ 80/20}) < (PY-6/D \text{ ó } N \text{ 80/20}) , \text{ y}$$

- el grupo del resto de las puzolanas, O, A, C y M, donde se obtienen las clasificaciones contrarias, es decir,

$$> SO_4^{=} \text{ lcp} > : (PY-4/O, A, C \text{ ó } M \text{ 80/20}) > (PY-6/O, A, C \text{ ó } M \text{ 80/20})$$

Interpretación VIII.3.3.2.2.(E)(F)

A diferencia de lo que ocurriere en los casos anteriores de la interpretación VIII.3.3.2.1. (E)(F), en los presentes, al no existir prácticamente nada de  $C_3A$  compitiendo con la  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana de turno por el 21,0% de  $SO_3$  inicial, mas y mejor podrá mostrar la misma su auténtico y verdadero "carácter", ya que los  $\bar{A}L$  que se originen en sus probetas respectivas, habrán de ser adscribibles en exclusiva a su cantidad de  $Al_2O_3^{r-}$  constitutiva respectiva; de aquí que por tal hecho se confirme una vez mas el diferente comportamiento de cada una de ellas, el cual y en definitiva las divide en dos sub-grupos, el protector ante el ataque sulfático, de la D y N, y el no protector ante dicho ataque del resto O, A, C y M, pudiéndose deducir mas facilmente y mejor por ello, y mediante aquellos  $\bar{A}L$ , RMF y RMC, tales contenidos relativos de  $Al_2O_3^{r-}$  de cada puzolana respecto a las demás aquí comparadas, y viceversa. Y todo ello al igual que ocurriere en igual caso en la POP, en el método L-A y en el método ASTM C 452.

Asímismo vale aquí íntegramente y con mayor razón, por su probable trascendencia tecnológica, los párrafos correspondientes y en particular los finales de la interpretación VIII.3.3.2.1 (H-1).

Por último y respecto a la discusión 3ª, se puede decir que las discrepancias habidas, en su caso, y dentro de un mismo rango, han de ser achacables, además de a la formación de ett-rf principalmente, a otras diferentes, pues en el caso de las puzolanas D y N, aquella también se minimiza bastante y las discrepancias, aunque menores, continúan existiendo. De aquí que, sobre todo en este último caso de tales puzolanas D y N, podrían ser achacables las mismas al mayor contenido de  $C_3S$  del PY-6 sobre el PY-4. Y el modo y manera bien pudiera ser la razón de la conclusión 6ª del ensayo de Fratini, es decir, la mayor disponibilidad de portlandita, desde el origen, en todos los correspondientes al PY-6 con formación mas rauda de toda la escasa ett-rf que se debe formar en ellos durante el tiempo de fraguado y endurecimiento de los mismos, con la pérdida de nocividad, que no de expansión -col-matación-, de aquella y consiguientemente menor  $\bar{A}L$  y mayor de RMF, RMC y Vu originados. Debiendo de ocurrir otro tanto con el resto de las puzolanas excepto con las de elevado contenido de  $Al_2O_3^{r-}$ , en este caso la M, en la cual aunque en principio pueda ocurrir lo mismo, como de

hecho ocurre, por la misma causa, ésta en los instantes iniciales del ensayo ayudará a fraguar y endurecer mas prontamente al sistema, que tendrá  $\text{SO}_4^{2-}$  lcp menores y mas pronto, y mayores RMF y RMC a tales edades iniciales, pudiendo "bloquear" y "aprisionar" en su interior parte de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como tal o bien hidratado a secas, la cual con posterioridad y por la citada mayor reserva portlandítica del medio, podrá dar al traste mas prontamente con sus probetas respectivas, como así ha ocurrido en este trabajo, en que las probetas del (PY-6/M 80/20), pese a originar menor  $\bar{\Delta L}$  se auto-destruyen 90 días antes que las del (PY-4/M 80/20). Viéndose todo ello confirmado por la forma acampanada que toma la evolución de los valores de porosidad correspondientes a aquél y no a éste.

Y en cuanto a la RMF y RMC se tiene que, en el primer caso, puzolanas D y N así ensayadas y comparadas, se confirma una vez mas el cierto carácter de INERTE  $\text{RM}$  que ambas poseen, además del de tal puzolanas, de aquí que los valores absolutos de las RMF y RMC, sean menores a todas las edades del ensayo que los de su cemento matriz acompañante (PY-4) ó (PY-6) solos, y sus relativos correspondientes  $\Delta \text{RMF}$  y  $\Delta \text{RMC}$  mayores, debiéndose mantener de este modo durante todo el ensayo, como así ha sucedido en este trabajo.

Sin embargo con el resto de las puzolanas O, A, C y M así ensayadas y comparadas, no debe ocurrir igual sino todo lo contrario, pese que aquí también en determinados casos y durante determinadas edades, puzolanas O, A y C, las RMF y/o RMC de sus probetas respectivas hayan sido menores que las de sus cementos portland matrices correspondientes (PY-4) ó (PY-6) solos. De aquí que, tales diferencias no se mantengan, sino que aumenten, conforme transcurre el ensayo, incluso las que de origen fueron mayores llegan a hacerse menores, hasta llegar a la rotura de las mismas, caso de las puzolanas M y C; no pudiéndose certificar igual para el resto por la brevedad del ensayo, 2 años para la O y A. Todo lo cual viene a confirmar que el comportamiento de las mismas desde el origen, es mas bien como tales puzolanas, que como INERTES  $\text{RM}$ , resultando el mismo de un evidente interés tecnológico por las precauciones que en adelante y al respecto se deban tomar; siendo lógicamente todo ello achacable por tanto en estos casos, a la  $\text{ett-rf}$   $\text{1}^{\text{ria}}$  y  $\text{2}^{\text{ria}}$  que tales cementos de mezcla deben de originar, según las conclusiones de la POP, y que tan penoso comportamiento mas temprano o mas tarde según su contenido respectivo de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , provoca en sus probetas correspondientes.

Por lo tanto y según todo lo anterior, la clasificación de las puzolanas comparadas y así ensayadas en función de su contenido relativo de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de cada una respecto de las demás, deducible en este caso de los valores de RMF y RMC correspondientes a las edades adecuadas de sus probetas respectivas, de menor a mayor valor por este orden, resulta ser totalmente coincidente con la obtenida en la POP, véase su conclusión VII .4.2,3\*, y la Tabla 81.

Por otra parte y respecto a los valores correspondientes de Porosidad Vu y  $\text{SO}_4^{\text{r-}}$  lcp todos vienen a confirmar lo dicho hasta el momento, es decir, el relativo parentesco

- de la puzolana O con la N y D, y
- de la puzolana A con la C y M,

en dicho orden, así como que en este método de ensayo H-1 y en el caso de las puzolanas D y N sobre todo es donde mas y mejor se nota inicialmente el efecto expansor y colmatante al mismo tiempo de la ett-lf.

Por último y antes de finalizar esta interpretación cabe destacar que las apreciables diferencias habidas en la evolución de los valores del parámetro derivado Vcl de la puzolana M al resto, han de ser achacables a su mayor contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , parte de la cual, la  $\text{I}^{\text{r-ia}}$ , participaría en el fraguado y endurecimiento de las probetas, y el resto, quedaría aprisionada en su interior durante los mismos con las consecuencias nocivas correspondientes - actuación de

"cuña" expansora - citadas anteriormente ; sin despreciar tampoco la expansividad adicional posible de la ett-lf de muy lenta formación de origen ión  $\text{Al}^{3+}$  del  $\text{C}_4\text{AF}$  y/o s.s.s., así como también la probable acción sinérgica entre ambas. No obstante ello no menoscaba en absoluto la posibilidad de su calificación y cualificación correspondiente a la edad de 28 días puesto que,

- hasta entonces ya ha transcurrido la suficiente y necesaria hidratación selenitosa de la masa conglomerante de las probetas para tal fin, y
- el hecho en cuestión sólo ocurre en las puzolanas eminentemente aluminicas, caso de la M, y similares.

VIII.3.3.2.3.- Cementos de Mezcla preparados con Cemento Portland de contenido mediano, bajo, escaso ó prácticamente nulo de  $C_3A$ , y las Puzolanas N, M, CV-10 y CV-19, indistintamente.

VIII.3.3.2.3.1.- Cementos de Mezcla preparados con Cementos Portland de mediano ó prácticamente nulo contenido de  $C_3A$ , el P-31, el P-5, el PY-4 y el PY-6, respectivamente, y Puzolana común la N, 80/20 en peso, y de elevado o escaso contenido de  $C_3A$ , el P-1 y el PY-1, respectivamente, y Puzolana común, la M, o sea el (P-1/M 60/40) y el (PY-1/M 80/20):

Antes de comenzar esta discusión se ha de hacer constar una vez más lo dicho a propósito en el apartado VIII.3.3.2. anterior de que en adelante lo que fundamentalmente se compara es el comportamiento de cementos de mezcla PA y/o PUZ como tales, ensayados mediante el método H-1, sin tener en cuenta para nada su cemento portland matriz y puzolana constitutivos respectivos, aunque los mismos,

- se conozcan por la circunstancialidad de este trabajo,
- se tengan en cuenta para justificar su comportamiento respectivo, y
- se comparen circunstancialmente, bien a igualdad de cemento portland matriz, bien a igualdad de puzolana, o bien a igualdad de ambos, por interés explícito al respecto.

Discusión VIII.3.3.2.3.1.

(E) Parámetros :  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$ , véanse Tablas 26, 41, 56, 73, 78 y 80.

1\*.- En todos los cementos de mezcla PA ó PUZ preparados y así ensayados, la evolución de los valores del  $\bar{\Delta}L$  y  $Vcl$  de sus probetas respectivas, es de aumento, el  $\bar{\Delta}L$ , y disminución la  $Vcl$ , ambos gradativos, pero cuya magnitud,

- aumenta proporcionalmente, en ambos casos, ó
- disminuye notablemente desde la edad de 7 a la de 14 días, en el caso de la  $Vcl$ ,

con el contenido de,

- $C_3A$ , del cemento portland que acompaña a la puzolana, y
- de  $Al_2O_3$ , o mejor  $Al_2O_3^+$ , de la puzolana acompañante.



No obstante y en cualquier caso, lo realmente destacable de este último parámetro,  $V_{cl}$ , es que la mayor parte del mismo transcurre, por lo general, en todos estos casos, durante los primeros 28 días del ensayo y más concretamente en los primeros 7 días, es decir, tanto más al contrario de lo que ocurriere con su cemento portland matriz acompañante respectivo, cuanto mayor fuere el contenido de  $C_3A$  del mismo, y viceversa; y todo ello, más aún, cuanto mayor es el contenido de  $Al_2O_3$  (%) de la propia puzolana, según su AQ, véase Tabla 11.

2ª.- La clasificación obtenida de tales cementos de mezcla PA en función del valor del  $\bar{A}L$  (y  $V_{cl}$ ) de sus probetas respectivas, de mayor a menor valor por este orden, ha sido la siguiente a casi todas las edades del ensayo, es decir,

$\bar{A}L$ > $V_{cl}$	(P-1/M 60/40)>(PY-1/M 80/20)>(P-31/N 80/20)>(P-5/N 80/20)>(PY-4/N 80/20)> > (PY-6/N 80/20) p.f.e.
--------------------------	--

Por otra parte y en todos los casos de puzolana N, a igualdad de edad el valor del  $\bar{A}L$  y  $V_{cl}$  de las probetas de cualquier cemento de mezcla de los citados, es menor que el de su cemento portland matriz respectivo, y el del correspondiente a un INERTE<sub>RS</sub> aumentando la diferencia entre ambos respectivamente con el contenido de  $C_3A$  del mismo, y ocurriendo exactamente todo lo contrario en el caso de la puzolana M.

No obstante llama bastante la atención el hecho de que pese a ser prácticamente nulo el contenido de  $C_3A$  de los cementos PY-4 y PY-6, las probetas de sus cementos de mezcla correspondientes citados, muestran valores de  $\bar{A}L$  y  $V_{cl}$  algo distintos, pero en favor de las del,

- primero, PY-4, hasta la edad de 28 días, y
- segundo, PY-6, desde la edad de 28 días hasta la de 730 días, siendo iguales en el resto.

3ª.- En el estudio comparativo de estos cementos de mezcla citados anteriormente, y ensayados según,

- el presente método acelerado de ensayo, H-1, y
- el método acelerado de ensayo ASTM C 452-68,

se observa como a igualdad de edad del ensayo, y cemento portland

matriz acompañante, los valores,

- del parámetro derivado  $\frac{\Delta L}{g. \text{ cemento }}$ , son notablemente mayores en este caso, H-1, que en aquél, ASTM C 452-68, cumpliéndose esta generalidad durante tantas más edades del ensayo, a partir de la inicial del mismo, cuanto menor es el contenido de  $C_3 A$  del cemento portland matriz acompañante de la puzolana N, y viceversa, y ocurriendo exactamente todo lo contrario con la M; mientras que a los valores,

- del parámetro absoluto  $\Delta L$  les ocurre otro tanto de un modo más acusado aún, es decir, durante prácticamente todas las edades del ensayo, véase Tabla 78.

Discusión VIII.3.3.2.3.1. (cont.)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta RMF$ ,  $\Delta RMC$ ,  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$ , véanse Tablas 28, 42, 43, 44, 58, 60, 61, 62 y 84.

1ª.- En todos los cementos de mezcla citados y así ensayados, la evolución de los valores de los parámetros RMF, RMC,  $\Delta RMF$  e  $\Delta RMC$ , de sus probetas respectivas ha sido,

- caso de los cementos de mezcla (P-31/N 80/20) y (P-5/N 80/20):

. caso del (P-31/N 80/20):

RMF e  $\Delta RMF$ : de aumento más o menos sinuoso hasta la edad final del ensayo,

RMC e  $\Delta RMC$ : de aumento continuado hasta alcanzar un valor máximo a la edad del ensayo de 270 días, tras el cual se produce un descenso suave hasta la edad final del mismo, es decir, su curva representativa adopta la forma de una campana irregular al igual que le ocurriere a su cemento matriz acompañante (P-31) solo, aunque de distinta forma y evolución, pues a éste se le llegan a auto-destruir sus probetas respectivas antes de la edad final del ensayo y a aquél no, ni a la citada edad.

. caso del (P-5/N 80/20):

RMF e  $\Delta RMF$ : de aumento continuado hasta la edad final del ensayo,

RMC e  $\Delta RMC$ : de aumento más o menos sinuoso hasta la edad final del ensayo, a diferencia, en ambos parámetros, de lo que ocurriere con su cemento matriz acompañante (P-5) solo, que adopta la consabida forma de campana.

- caso de los cementos de mezcla (PY-4/N 80/20) y (PY-6/N 80/20): de aumento continuado en ambos parámetros y sus derivados absolutos correspondientes, hasta la edad final del ensayo, al igual que ocurriere con sus cementos matrices acompañantes (PY-4) y (PY-6) solos respectivos, aunque de menores valores absolutos, y lógicamente mayores relativos que los de éstos, durante todas las edades del ensayo.

Y en cuanto a los parámetros derivados relativos  $Vc \Delta RMF$  y  $Vc \Delta RMC$  de disminución rápida, progresiva y más o menos sinuosa hasta la práctica nulidad y negatividad, o no, de los mismos, aunque claro está y como se verá en la discusión siguiente, de valores diferentes entre sí y respecto a su cemento matriz acompañante respectivo solo,

- caso del cemento de mezcla (P-1/M 60/40): Ya visto anteriormente en la Discusión VIII.3.3.2.1.1<sup>a</sup>,
- caso del cemento de mezcla (PY-1/M 80/20): Se verá en la Discusión venidera VIII.3.3.2.3.5.

2<sup>a</sup>. - Las clasificaciones que se obtienen a igualdad de,

- edad fundamental del ensayo de 1, 14, 28, 365 y 730 días, y
- cemento de mezcla PA 80/20 de puzolana común,
  - . N, y cemento portland matriz acompañante P-31, P-5, PY-4 y PY-6, respectivamente, ó
  - . M, y cemento portland matriz acompañante P-1 y PY-1 respectivamente,

en función de los valores de RMF y RMC, de mayor a menor por este orden, de sus probetas respectivas, han sido las siguientes, véase Tabla 84,

Tabla 84

Edad (días)	P M F	P M C
1	(P-31/N 00/20)(PY-1/N 00/20)(P-1/N 00/20)(P-5/N 00/20)(PY-4/N 00/20)(PY-6/N 00/20)	(PY-1/N 00/20)(P-1/N 00/20)(P-31/N 00/20)(PY-4/N 00/20)(PY-5/N 00/20)(PY-6/N 00/20)
14	(P-1/N 00/40)(PY-1/N 00/20)(PY-6/N 00/20)(P-31/N 00/20)(P-5/N 00/20)(PY-4/N 00/20)	(P-1/N 00/40)(PY-1/N 00/20)(PY-6/N 00/20)(PY-4/N 00/20)(P-31/N 00/20)(P-5/N 00/20)
28	(P-1/N 00/40)(PY-1/N 00/20)(PY-6/N 00/20)(P-31/N 00/20)(P-5/N 00/20)(PY-4/N 00/20)	(P-1/N 00/40)(PY-1/N 00/20)(PY-6/N 00/20)(PY-4/N 00/20)(P-31/N 00/20)(P-5/N 00/20)
365	(PY-6/N 00/20)(PY-4/N 00/20)(P-31/N 00/20)(P-5/N 00/20)(P-1/N 00/40)(PY-1/N 00/20)	(PY-6/N 00/20)(PY-4/N 00/20)(P-31/N 00/20)(P-5/N 00/20)(P-1/N 00/40)(PY-1/N 00/20)
730	(PY-6/N 00/20)(PY-4/N 00/20)(P-31/N 00/20)(P-5/N 00/20)(P-1/N 00/40)(PY-1/N 00/20)	(PY-6/N 00/20)(PY-4/N 00/20)(P-31/N 00/20)(P-5/N 00/20)(P-1/N 00/40)(PY-1/N 00/20)

Por otra parte en el caso de los cementos de mezcla de cemento portland matriz acompañante PY-4 ó PY-6, las RMF y las RMC de los mismos sólo es siempre mayor que la correspondiente de aquéllos. Este hecho ocurre del mismo modo para el caso de los cementos matrices acompañante (P-31) y (P-5), a las edades de 14 y 28 días, pero no a los 365 y/o 730 días, que ocurre al contrario, es decir, que la RMF y RMC de sus cementos respectivos son mayores que los de sus cementos portland matrices respectivos solos.

No obstante llama bastante la atención el hecho de que pese a ser los cementos portland acompañantes PY-4 y PY-6 de nulo contenido de  $C_3A$ , ambos muestran valores de RM en sus cementos de mezcla PA 80/20 con puzolana N de parecido rango, pero diferentes, siendo por lo general mayores los del PY-6.

#### Discusión VIII.3.3.2.3.4(cont.)

(G) Parámetro: Porosidad, véase Tablas 28, 45 y 64.

1ª.- En todos ellos se produce, una disminución notable de porosidad a la edad de 7 días, seguida de un aumento también notorio de la misma, el cual alcanza su valor máximo tanto mas tarde cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz constitutivo, así se tiene que,

	(P-1/M 60/40)	(PY-1/M 80/20)	(P-3/N 80/20)	(P-5/N 80/20)	
>(Poros)>	730 d.	180 d.	120 d.	90 d.	>
máx					
(%)	> (PY-4/N 80/20) > (PY-6/N 80/20)				
		14 d.	14 d.		

tras el cual continúa la disminución de la porosidad respectiva hasta la edad final del ensayo.

De los cementos de mezcla (P-1/M 80/20) y (PY-1/M 80/20) en las discusiones,

- anterior VIII.3.3.2.1, 1ª el primero, y
- posterior VIII.3.3.2.3.5, 1ª el segundo, respectivamente

2ª.- La clasificación que se obtiene de los cementos de mezcla PA citados a casi todas las edades del ensayo excepto a las de 14, 21 y 28 días, en función de los valores de este parámetro porosidad de mayor a menor, por este orden de sus probetas respectivas, ha sido,

> Poros > (%)	(P-1/M 60/40) > (P-5/N 80/20) > (P-31/N 80/20) > > (PY-6/N 80/20) > (PY-4/N 80/20) > (PY-1/M 80/20)	ed. intermed.
	(P-1/M 60/40) > (PY-6/N 80/20) > (PY-1/M 80/20) > > (PY-4/N 80/20) > (P-5/N 80/20) > (P-31/N 80/20)	ed. finales

Discusión VIII.3.3.2.3.1(cont.)

(H) Parámetros: Vu, ΔVu y VcΔVu, véase Tablas 30, 45, 46 y 66.

En general se puede decir que ocurre otro tanto que en las discusiones anteriores, aunque lógicamente con el orden de crecimiento cambiado.

Discusión VIII.3.3.2.3.1(cont.)

(I) Parámetro:  $SO_4^{=}$  lcp, véase Tablas 30, 47 y 69.

1ª.- En todos ellos se produce un aumento de  $SO_4^{=}$  lcp conforme transcurre el ensayo, excepto en los correspondientes a la puzolana M, que ocurre lógicamente lo contrario.

2ª.- A igualdad de edad, excepto la de 7 días, la clasificación que se obtendría de tales cementos de mezcla comparados, de mayor a menor  $SO_4^{=}$  lcp es la siguiente,

- caso de los que poseen puzolana N,

>SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> lcp>	(PY-6/N 80/20) > (PY-4/N 80/20) > (P-5/N 80/20) > > (P-31/N 80/20)	de 14 a 730 d.
---------------------------------------	---	----------------

- caso de los que poseen puzolana M,

>SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> lcp>	(PY-1/M 80/20) > (P-1/M 60/40)	p.f.e.
---------------------------------------	--------------------------------	--------

Interpretación VIII.3.3.2.3.1 (E)(F)(G)(H) e (I)

Primeramente y respecto a la puzolana N, únicamente se puede decir que ello es la confirmación evidente una vez mas, de que los geles  $CSH_2$  de la misma, deben de existir en el origen de sus probetas, tipo H-1 respectivas, al igual que en las homónimas del método ASTM C 452-68, o sea en menor "cantidad" y "calidad" que en las tortas también homónimas del L-A, ya que o si no todas las probetas hubiesen originado -a igualdad de edad, ó no, quizás-, igual o parecido  $\bar{A}L$ , tuviese poco o nada de  $C_3A$  a su cemento portland matriz acompañante respectivo ¡Y eso no ha ocurrido!, sino todo lo contrario. Lo cual confirma lo dicho al principio. De aquí que al tener que ser igual la "cantidad", (y quizás también la "calidad"),

de aquellos,  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$ , y también aunque escasa la  $\text{ett-rf}$  correspondiente, presente en todos los casos a igualdad de edad del ensayo, y tener que formarse presumiblemente mas rápidamente que la  $\text{ett-lf}$ , no podrán evitar aquí tampoco que desde el origen se forme ésta y origine el  $\bar{\Delta}\text{L}$  correspondiente, y sus parámetros derivados, en proporción directa, lógicamente, al contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento portland matriz acompañante respectivo, como así ha ocurrido en este trabajo. Por lo que tal disminución general del  $\bar{\Delta}\text{L}$  y parámetros derivados de la probeta, respecto al correspondiente a su cemento portland matriz acompañante respectivo solo, confirma una vez más en este método de ensayo H-1, el carácter eminentemente protector ya conocido antes de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  y por tanto del comportamiento "anti-sulfato" de este tipo de puzolanas tan característico como es la N y similares.

Y respecto a la puzolana M se puede decir otro tanto corregido y aumentado a lo dicho en la parte final del párrafo segundo dedicado a la N, pues en el caso de esta puzolana M, su  $\text{ett-rf}$  correspondiente en el (PY-1/M 80/20) debe de superar en el origen a la  $\text{ett-lf}$  correspondiente al  $\text{C}_3\text{A}$  del P-31 en el (P-31/M 80/20), y con mayor razón aún, si aquella se ve potenciada sinérgicamente por la  $\text{ett-lf}$  del  $\text{C}_3\text{A}$  del P-1 en el (P-1/M 60/40) ó el PY-1 en el (PY-1/M 80/20), debiendo de ocurrir ésto de igual ó semejante manera y cuantía cuanto mas tendencia aluminica posea la puzolana silico-aluminosa de que se trate, como así ha ocurrido en este trabajo.

No obstante el hecho de que:

- a) A la edad de 7 días se cumpla que la  $\text{Vcl}$  de las probetas del cemento de mezcla (P-5/N 80/20) haya sido superior a la de su cemento (P-5) solo, pese al efecto diluyente y puzolánico-tobermorfítico de la puzolana N, únicamente puede ser explicable por la mayor hidratación facilitada al sistema por la porosidad adicional de la misma que lo conforma, así como la posible mayor acción sinérgica, pues el cociente  $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}} (\%)}{\text{C}_3\text{A} (\%)}$  lo debe de tener mas apropiado para ello que en el caso de que el cemento portland matriz acompañante sea el (P-31), y
- b) A edades posteriores a la de 7 días se cambie el orden entre los cementos de mezcla (P-31/N 80/20) y (P-5/N 80/20), por idéntica posible razón anterior que sin acción sinérgica alguna ya para entonces, quedará supeditado al contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  residual respectivo que por lógica deberá ser el del (P-31). (7,62% contra 6,83%, respectivamente).

Por último y respecto a los cementos (P-31/N 80/20), (P-5/N 80/20) y (PY-1/M 80/20) en concreto, lo acaecido por ejemplo entre estos cementos, probablemente se deba a dos causas ocurridas en paralelo:

- a) el gran efecto protector de la tobermorita de origen N sobre la hidratación selenitosa del 6,10% de  $C_3A$  de la fracción P-31, de modo y manera que se podría hablar de la existencia de una cierta acción "antagónica" de tal tobermorita sobre la etf-1f de dicho origen, evitando su formación y expansividad característica, y
- b) al gran efecto potenciador de la etf-1f de origen M por efecto de la escasa, pero no nula, etf-1f formada a la vez del  $C_3A$  escaso pero no nulo de la fracción de su cemento PY-1, hasta tal punto, que se podría hablar de la existencia de una cierta acción sinérgica entre ambas.

De aquí que finalmente la fracción P-31, pese a tener mas  $C_3A$  (en teoría 6,096% de  $C_3A$ ) que la del PY-1 (en teoría 3,064% de  $C_3A$ ), haya podido resistir mas y mejor el severísimo ataque selenitoso a que ha sido sometida.

Con lo que de esta forma y en definitiva una vez mas se confirma con claridad, que el constituyente  $Al_2O_3^r$  de la puzolana M ha de ser tan "apreciable", en "cantidad" y "calidad", que no sólo debe superar con mucho al de la puzolana N y enmascarar por exceso la poca nocividad acompañante derivada del escaso contenido de  $C_3A$  (3,1%) de su fracción PY-1, sino que además llega a dominar y superar los efectos nocivos originados por la etf-1f del cemento P-31 con 6,10 % de  $C_3A$  en su cemento de mezcla (P-31/N 80/20) y con mas razón del (P-5/N 80/20) (5,46%).

Por otra parte se confirma igualmente también y una vez más como cada cantidad de ettringita probable a formar así como sus consecuencias expansoras correspondientes debe necesitar para impedirse su correspondiente "cantidad" y "calidad" de tobermorita, al haber sido esta constante en los cementos de mezcla en cuestión (P-31/N 80/20) y (P-5/N 80/20), la expansividad derivada de los mismos ha sido función directa de su  $C_3A$  correspondiente aportado; de aquí que para hacer que hubiera dado igual  $\bar{\Delta}L$  el cemento de mezcla (P-31/N 80/20) debería haber sido 70/30 ó quizás 60/40 con lo que ya si se hubiese alcanzado la cantidad y calidad deseada de la misma para dicho fin protector, (o sea para que  $\bar{\Delta}L_{xd}(P-31/N 70/30 \text{ ó } 60/40) = \bar{\Delta}L_{xd}(P-5/N 80/20)$ ).

Por lo tanto y en definitiva, todo ello viene a confirmar una vez mas que ambas puzolanas N y M son TOTALMENTE ANTAGONICAS EN SU COMPORTAMIENTO, ó "anti-sulfato" ó "pro-sulfato", respectivamente, de aquí que tengan que ser obligatoria y necesariamente CONTRARIAS EN SU COMPOSICION Y CONSTITUCION FISICO-QUIMICA, como así ha sucedido en este trabajo, porque así sucede en la realidad.

Y en cuanto a las RMF y las RMC se tiene el hecho de que ambos parámetros absolutos RMF y RMC, en el cemento de mezcla PA (P-31/N 80/20) hayan alcanzado a cualquier edad citada, mayores valores de los mismos que el cemento de mezcla PA (P-5/N 80/20), pese a tener este último, tanto en valor absoluto como relativo, menor cantidad de  $C_3A$  y consiguientemente poder formar menor cantidad de  $ett-lf$  que aquél, abonado además por el hecho de que en los mismos las probetas no tienden a auto-destruirse sino al revés; lo cual debe indicar que en cierta medida la presencia de  $SiO_2^{r-}$  no debe impedir totalmente la formación de  $ett-lf$  en su totalidad posible y si sólo dificultarla, pero haciendo además que dentro de tales diferencias se vea menos impedida la 1ª que la 2ª, puesto que la cantidad presente de  $SiO_2^{r-}$  es constante y por ello la relación  $ett-lf/SiO_2^{r-}$  está a favor de la 1ª y en contra de la 2ª, lo cual unido al hecho de haber originado en la mayoría de las edades alguna menor porosidad y alguna menor expansión, da pie a pensar que la misma haya de ser además expansora y colmatante, coincidiendo de este modo y una vez mas con lo que ya se dijera a tal fin en el apartado VIII.3.3.2.1 (G) (H).

Por lo tanto todo ello habrá de originar lógicamente mayores valores de RMF y RMC.

Por otra parte lo confirma el hecho de que tan sólo a la edad de 1 día las clasificaciones obtenidas en RMF, RMC e  $\Delta RMC$  (7 días) sean totalmente coincidentes con las que se obtendrían en función del contenido de  $C_3A$  aportado respectivo, debiéndose por tanto a idénticas razones dadas en las interpretaciones VIII.2.2.1(F), 2ª y VIII.3.3.1(F), 2ª.

De aquí que la escasa agua de amasado hidrate, por probabilidades a mayor número de granos del componente que mas exista, en este caso la fracción cemento portland matriz respectiva y en ella su contenido de  $C_3A$  correspondiente, el cual habrá de ser mayor en el caso del (P-31/N 80/20) que en el caso del (P-5/N 80/20), debiendo de ser por tanto aquél el que mas  $ett-lf$  deba formar y por tanto mayor



RMF y RMC deba originar a la edad de 1 día, como así ha ocurrido en este trabajo.

De aquí que en las clasificaciones diversas obtenidas de ambos en función de los distintos parámetros analizados, los mismos no cambian de lugar de principio a fin del ensayo.

Y en cuanto a los hechos denunciados al final de la Discusión en cuestión, sobre que los valores de estos parámetros absolutos de los cementos portland matrices correspondientes (PY-4) y (PY-6) solos son mayores que los de los cementos de mezcla PA 80/20 con la puzolana N respectiva en cuestión, confirman el hecho de que esta puzolana tiene un cierto carácter de  $INERTE_{PM}$  sobre todo a las edades iniciales hasta 21 días, ya que los ha originado menores que los valores absolutos y relativos correspondientes, es decir,

relativos    absolutos

9,06 < 13,11 x 0,8 =	10,49	< 13,11
15,80 < 33,67 x 0,8 =	26,94	< 33,67
19,15 < 36,65 x 0,8 =	29,32	< 36,67
24,74 < 35,35 x 0,8 =	28,28	< 35,35

no ocurriendo otro tanto, sino todo lo contrario, y al resto de las edades del ensayo, con los valores relativos, pero a partir de la edad de 28 días inclusive en adelante, lo cual viene a confirmar que esta puzolana N podrá cumplimentar el ensayo de Fratini al menos a la edad de 28 días como así ha ocurrido en este trabajo. De aquí que puede decirse que posee una lenta pero segura reaccionabilidad con  $Ca(OH)_2$  con sus consecuencias tecnológicas pertinentes, lo cual es coincidente con la conclusión correspondiente de Fratini. Por el contrario, en el caso de que tales cementos portland matrices acompañantes correspondientes fueran de contenido mediano de  $C_3A$ , caso del P-31 y el P-5, a las edades iniciales deberán originar algo más et-1f y consiguiente mayores valores de RMF y/o RMC y al contrario a las anteriores, como así ha ocurrido en este trabajo. Y el hecho de que las clasificaciones obtenidas de los cementos de mezcla citados así ensayados mediante los valores de los RMF y RMC y sus parámetros derivados de sus probetas respectivas, no sean exactamente coincidentes en tiempo y forma, verificándose por lo general las variaciones respectivas en el tiempo, alguna(s) edad(es) antes, en el caso de las RMF ó  $\Delta RMF$  que en el caso de los RMC ó  $\Delta RMC$ , respectivamente, viene a confirmar una vez más la mayor sensibilidad de aquel parámetro sobre éste.

De igual modo se confirma la participación notable de la ettringita de distinto origen y etiología en la consecución de RMF y RMC, mientras el grado de fraguado y dureza de la probeta se lo permite, pues cuando tal no ocurre proviene la rotura de la misma como así ha sucedido en este trabajo. De aquí que en la primera fase citada a más  $C_3A$  y/o  $Al_2O_3^r$  posea la probeta, más ett-lf y/o ett-rf formará, cuya expansividad característica la hará además colmatante para entonces, con aumento de RM, y todo lo contrario después, como así ha sucedido en este trabajo durante las edades iniciales (hasta la de 28 días) y siguientes, del ensayo, respectivamente.

Además el hecho de que el cemento de mezcla (PY-1/M 80/20) cambie totalmente de lugar a lo largo de las múltiples clasificaciones obtenidas, confirma la idea de que gracias a la probable mayor velocidad de formación de la ett-T por el probable sinergismo existente entre la ett-rf y la ett-lf formadas en sus probetas al unísono aunque en distinta cuantía, la misma durante las edades iniciales de las probetas debe ser , colmatante (no en su totalidad) y endurecedora, o sea, aumento notable de RM, quedando restos de los respectivos reactivos originarios de aquellas, en especial  $Al_2O_3^r$  los cuales se encargarían a posteriori de la auto-destrucción selenitosa de las mismas, como así ha ocurrido en este trabajo, viéndose ello confirmado por el hecho contrario, no auto-destrucción selenitosa de las correspondientes probetas a su cemento portland matriz (PY-1) solo.

No obstante, lo realmente destacable de los valores obtenidos de este parámetro porosidad en este caso, es que los mismos son la prueba palpable de las precariedades de la técnica empleada en este trabajo para la determinación de los valores de los mismos, al objeto de poder diferenciar claramente a los cementos de elevada RS de los que no lo son tanto, pues mientras que las probetas del cemento (P-1/M 80/20), (P-31/N 80/20) y (P-5/N 80/20) han alcanzado valores bastante próximos de porosidad - lo cual equivaldría a suponer que su estabilidad de volumen también lo era - los valores de los parámetros RMF y/o RMC vienen a demostrarnos el estado "real" de cada una de ellas, pues mientras los del primero se encuentran en la ante-sala de su auto-destrucción selenitosa total y definitiva, de las de los segundos no se puede decir lo mismo sino todo lo contrario, véase la Fig. 11.

Por lo tanto y en definitiva de lo anterior se deriva que la utilización de materiales puzolánicos, considerados como un TODO UNICO, HOMOGENEO E INDIVISIBLE, en la preparación de morteros (y del mismo modo hormigones) tradicionales de cementos de mezcla PA y/o PUZ no elevará siempre el grado de compacidad de los mismos, o lo que es lo mismo no rebajará siempre su grado de porosidad correspondiente, propiedad esta que es sinónimo de una mayor RS de aquellos. De aquí que dicho parámetro compacidad o su inverso la porosidad, escasa para el caso que se destaca, no haya resultado ser condición "sin equanum" para que los mismos hayan podido ser calificados por su comportamiento como de elevada RS, pues en este trabajo se han conseguido preparar bastantes morteros,

- de elevada porosidad (similar a los destruidos totalmente por ataque selenitoso), que han resultado serlo, caso de los preparados con las puzolanas silíceas D y N, y
- de escasa porosidad o porosidad común (menor que la de los destruidos) que no han resultado serlo, caso de los preparados con la puzolana aluminica M.

De aquí que pueda decirse con fundamento que la elevada RS de los primeros no ha sido debida a la "escasa porosidad de los mismos (hecho falso)" sino a la composición físico-química de las puzolanas D o N que los han constituido, y viceversa de los segundos, de la puzolana M.

No obstante y para el caso que nos ocupa de las puzolanas D y N, se puede decir que los valores de la porosidad de sus probetas respectivas, obtenidos a igualdad de edad, cemento de mezcla y cemento Portland matriz constitutivo común, P o PY, han sido,

- mayores con la puzolana D que con la N,
  - mayores con la relación  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$  que con la  $\frac{a}{c} = c = \text{cte.}$
- ocurriendo todo lo contrario con los correspondientes al parámetro Vu.

VIII.3.3.2.3.2.- Cementos de Mezcla preparados con Cemento Portland de contenido mediando de  $C_3A$ , el P-31, y Puzolana común N, 80/20, 70/30 y 60/40, en peso, respectivamente.

Discusión VIII.3.3.2.3.2. (cont.)

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$ , véanse Tablas 26, 41, 77 y 78.

1ª.- En todos los cementos de mezcla preparados, la evolución de los valores del  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  de sus probetas respectivas, es de aumento, el  $\bar{\Delta L}$ , y disminución la  $V_{cl}$ , ambos gradativos, al igual que ocurriere con su cemento portland matriz constituyente común (P-31) solo, pero cuyo orden de magnitud varía lógicamente en valor absoluto de un cemento de mezcla a otro, y relativo, respecto al del (P-31) solo.

No obstante y en cualquier caso lo realmente destacable de este último parámetro,  $V_{cl}$ , es que la mayor parte del mismo transcurre, por lo general en todos estos casos, durante los primeros 28 días del ensayo, y tanto más completamente cuanto mayor es el contenido de puzolana N, y viceversa hasta llegar al (P-31) solo.

2ª.- La clasificación obtenida de tales cementos de mezcla citados en función del valor de  $\bar{\Delta L}$  (y  $V_{cl}$ ) de sus probetas respectivas, de mayor a menor por este orden, ha sido la siguiente a todas las edades del ensayo,

$\bar{\Delta L}$ $V_{cl}$	(P-31/N) ; (100/00) > (80/20) > (70/30) > (60/40)	p.f.e.
------------------------------	---	--------

Por otra parte y todos los casos, a igualdad de edad del ensayo, el valor del  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  de las probetas de cualquier cemento de mezcla de los citados, es menor que el de su cemento portland matriz acompañante común (P-31) solo, aumentando lógicamente la diferencia con la adición de puzolana N, y viceversa.

3ª.- En el estudio comparativo de estos cementos de mezcla citados anteriormente, y ensayados según,

- el presente método acelerado de ensayo, H-1, y
- el método acelerado de ensayo ASTM C 452-68,

se observa como a igualdad de edad del ensayo, los valores del parámetro derivado  $\frac{\bar{\Delta L}}{g.cemento}$ , y absoluto  $\bar{\Delta L}$ , disminuyen - su mayoría, en el 80/20, hasta tornarse en notable minoría, en el

hermano 60/40, en este método de ensayo H-1, respecto a aquél, ASTM C 452-68, con la adición de puzolana N, y viceversa, en cuyo caso la máxima mayoría por tanto es la del cemento (P-31) solo, véanse Tablas 77 y 78.

Discusión VIII.3.3.2.2. (cont)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta$ RMF,  $\Delta$ RMC,  $V_c\Delta$ RMF y  $V_c\Delta$ RMC véanse Tablas 28, 29, 42, 43 y 44.

4ª.- 1º.- Sea cual fuese el cemento de mezcla de los citados así ensayados, la evolución de los valores de estos parámetros RMF, RMC,  $\Delta$ RMF e  $\Delta$ RMC ha sido:

- RMF e  $\Delta$ RMF: de aumento más o menos sinuoso hasta la edad final del ensayo a diferencia de lo que le ocurriera a su cemento matriz acompañante (P-31) solo, cuyos valores adoptaron la forma de campana irregular.
- RMC e  $\Delta$ RMC: de aumento continuado hasta alcanzar un valor máximo a la edad del ensayo de 270 días, tras el cual se produce un descenso suave hasta la edad final del mismo, es decir, su curva representativa adopta la forma de una campana irregular al igual que le ocurriera a su cemento matriz acompañante (P-31) solo, aunque de distinta forma y evolución, pues a éste se le llegan a auto-destruir sus probetas respectivas antes de la edad final del ensayo y a aquéllos no, ni a la citada edad.

Y en cuanto a los valores correspondientes de los parámetros  $V_c\Delta$ RMF y  $V_c\Delta$ RMC ha sido disminución rápida, progresiva y más o menos sinuosa hasta la práctica nulidad de los mismos, siendo en cualquier caso los valores correspondientes a los 28 primeros días del ensayo los mayores de todos ellos.

2º.- Las clasificaciones obtenidas a las edades fundamentales del ensayo de los cementos de mezcla citados, junto con su cemento matriz acompañante (P-31) solo, en función de los valores de RMF, RMC,  $\Delta$ RMF e  $\Delta$ RMC, de menor a mayor por este orden, de sus probetas respectivas, han sido las siguientes:

- RMF :

. hasta la edad de 60 días:

> RMF >	(P-31/N) ; (80/20) > (70/30) > (60/40)	d. 1 a 60 d.
---------	--	-----------------

oscilando durante ellas la posición del (P-31) solo, sucesivamente desde el extremo izquierdo hasta el extremo derecho.

. desde 90 a 730 días:

< RMF <	(P-31/N) ; (100/00) < (80/20) < (70/30) < (60/40)	d. 90 a 730 d.
---------	---	-------------------

- RMC, RMF e RMC: se pueden compendiar en una sola para todas las edades del ensayo:

RMC < Δ RMF < Δ RMC	(P-31/N) ; (100/00) < (80/20) < (70/30) < (60/40)	p.f.e
---------------------------	---	-------

Y consiguientemente las obtenidas en función de los parámetros derivados relativos  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$  han de ser todo lo contrario a esta última.

#### Discusión VIII.3.3.2.3.2. (cont.)

(G) Parámetro: Porosidad, véanse Tablas 28 y 45.

1ª.- En todos los cementos de mezcla citados la porosidad de sus probetas disminuye sinuosamente durante el transcurso del ensayo de tal modo que en todos los casos se produce un mínimo de porosidad a la edad de 7 días, (en el caso del cemento (P-31) solo lo fué a la edad de 14 días), seguido de un máximo alcanzado tanto más pronto cuanto mayor es la cantidad de puzolana N añadida.

Así,

- en el cemento de mezcla 60/40 fué a la edad de 21 días,
  - " " " 70/30 " " 60 " , y
  - " " " 80/20 " " 120 " , es decir
- 30 días después del último mínimo alcanzado por su cemento matriz (P-31) solo, tras el cual sus probetas marcharon a la consecución de su auto-destrucción total con aumento gradativo de la porosidad de las mismas.

Y todo ello por tanto a diferencia de lo que ocurriere con su cemento matriz (P-31) solo.

- 2\*.- La clasificación obtenida a todas las edades del ensayo de los cementos de mezcla citados, junto con su cemento portland matriz acompañante (P-31), en función de los valores de porosidad de sus probetas respectivas, de menor a mayor por este orden, ha sido la siguiente:

< Poros <	(P-31) < (P-31/N 80/20) < (P-31/N 70/30) < (P-31/N 60/40) < (P-31)
	h. 180 d. de 180 a 730 d.

Discusión VIII.3.3.2.3.2. (cont.)

(H) Parámetros: Vu, ΔVu e VcdVu, véanse Tablas 28, 30, 45 y 46.

- 1\*.- En todos los cementos de mezcla PA y PUZ preparados y así ensayados, la evolución y desarrollo de los valores de Vu de sus probetas respectivas sufre un aumento gradativo durante el transcurso del ensayo hasta alcanzar un valor máximo a la edad común de 365 días, tras el cual se origina el descenso correspondiente hasta la edad final del ensayo.
- 2\*.- A igualdad de edad del ensayo se origina que la Vu de las respectivas probetas de tales cementos de mezcla disminuye con la adición de puzolana N siendo hasta la edad de 545 días todas ellas menores que las de su cemento portland (P-31) solo; y estando comprendido el valor del mismo a la edad final del ensayo entre el del cemento de mezcla 80/20 y el hermano 70/30, es decir,

> Vu >	(P-31/N); (100/00) > (80/20) > (70/30) > (60/40)	h. 545 d.
	(P-31/N); (80/20) > (100/00) > (70/30) > (60/40)	a 730 d.

Discusión VIII.3.3.2.3.2. (cont.)

(I) Parámetros :  $SO_4^{=}$  lcp y Vu, véanse Tablas 30 y 47.

- 1\*.- En todos los cementos de mezcla la cantidad de  $SO_4^{=}$  lcp aumenta en el transcurso del ensayo al igual que ocurriere con su cemento (P-31) común solo.
- 2\*.- La clasificación obtenida de tales cementos de mezcla y de su cemento portland (P-31) solo en función de la cantidad de  $SO_4^{=}$  lcp

de mayor a menor por este orden ha sido la siguiente:

$\bar{SO}_{41cp}^-$	$> (P-31/N); (60/40) > (70/30) > (80/20) > (100/00)$
---------------------	--

lo cual indica la captación de  $\bar{SO}_4^-$  por el  $C_3A$  de la fracción cemento P-31

VIII.3.3.2.3.3.- Cementos de Mezcla preparados con Cemento Portland de mediano contenido de  $C_3A$ , el P-31, y las Puzolanas N, CV-10 y CV-19, respectivamente, 70/30, en peso:

Discusión VIII.3.3.2.3.3.-

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$ , véanse Tablas 26, 41, 77 y 78.

1ª.- En todos los cementos de mezcla PUZ preparados y así ensayados, la evolución de los valores del  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  de sus probetas respectivas, es de aumento, el  $\bar{\Delta L}$ , y disminución la  $V_{cl}$ , ambos gradativos, al igual que ocurriese con su cemento portland matriz constituyente común (P-31) solo, pero cuyo orden de magnitud varía en valor absoluto de una puzolana a otra y relativo respecto al del (P-31), solo, y al correspondiente a un INERTE<sub>RS</sub>.

No obstante y en cualquier caso lo realmente destacable de este último parámetro,  $V_{cl}$ , es que la mayor parte del mismo transcurre por lo general en todos estos casos, durante los primeros 28 días del ensayo, con el hecho algo paradójico de que en el caso de la puzolana CV-10 la disminución es similar en la forma a la de su cemento portland matriz acompañante (P-31) solo, pues el descenso brusco de los valores de dicho parámetro no se produce de la edad de 7 a la de 14 días, sino desde la de 14 días a la de 28 días.

2ª.- La clasificación de tales cementos de mezcla en función del valor del  $\bar{\Delta L}$  (y  $V_{cl}$ ) de sus probetas respectivas, de mayor a menor por este orden, ha sido la siguiente a todas las edades del ensayo:

$\bar{\Delta L}$ $V_{cl}$	$> (P-31/CV-10 \ 70/30) > (P-31/CV-19 \ 70/30) > (P-31/N \ 70/30)$	p.f.e.
------------------------------	--	--------

Por otra parte, tan sólo en el caso de las puzolanas N y CV-19, el valor del  $\bar{\Delta L}$  de las probetas de los cementos de mezcla respectivos, ha sido,



- de origen, caso de la puzolana N, ó
  - a partir de la edad de 14 días, caso de la puzolana CV-19, menores que el del cemento portland matriz acompañante común (P-31) solo, habiendo ocurrido con la puzolana CV-10 todo lo contrario.
- 3ª.- En el estudio comparativo de estos cementos de mezcla citados anteriormente y ensayados, según,
- el presente método acelerado de ensayo, H-1,
  - el método acelerado de ensayo ASTM C 452-68, y
  - el método acelerado de ensayo L-A,
- se observa como entre los dos primeros, a igualdad de edad del ensayo y puzolana, los valores
- del parámetro derivado  $\frac{\Delta L}{g. \text{ cemento}}$ , caso del H-1 y ASTM C 452, son notablemente,
  - . menores, con la puzolana N, y
  - . mayores, con las puzolanas CV-10 y CV-19, respectivamente, en este caso, H-1, que en aquél, ASTM C 452-68, mientras que a los valores,
  - del parámetro absoluto  $\Delta L$ , respectivamente, les ocurre
  - . totalmente lo mismo con la puzolana N, y
  - . parcialmente lo mismo con las puzolanas CV-10 y CV-19 dado que la generalidad anterior sólo se cumple desde la edad de 21 y 60 días, respectivamente, hasta el final del ensayo.
- Por el contrario y del estudio comparativo de las puzolanas CV-10 y CV-19, en exclusiva, estudiadas a través de los tres métodos de ensayo anteriores, se observa que los resultados obtenidos han tenido,
- a las edades iniciales del ensayo, idéntico comportamiento entre sí en los tres métodos de ensayo, mientras que,
  - al resto de las edades del ensayo, distinto a los correspondientes obtenidos del ensayo L-A y ASTM C 452.

Discusión VIII.3.3.2.3.3 (cont.)

(F) Parámetros : RMF, RMC,  $\Delta$ RMF,  $\Delta$ RMC,  $Vc\Delta$ RMF y  $Vc\Delta$ RMC véase Tablas 28, 29, 42, 43, 44 y 85.

- 1ª.- Sea cual fuese el cemento de mezcla de los citados y así ensayados, la evolución de los valores de estos parámetros de sus probetas respectivas ha sido:
- caso de la puzolana N:

- . RMF e  $\Delta$ RMF de aumento sinuoso hasta la edad final del ensayo y a diferencia de lo que ocurriere con su cemento matriz acompañante (P-31) solo,
  - . RMC e  $\Delta$ RMC de aumento hasta alcanzar un valor máximo tras el cual desciende suavemente hasta la edad final del ensayo, es decir, la curva representativa adopta la forma de una campana irregular al igual que ocurriere con su cemento matriz acompañante (P-31) solo, aunque de distinta forma y evolución, pues a éste se le llegan a auto-destruir sus probetas correspondientes antes de la edad final del ensayo y aquél no, ni a la citada edad.
- caso de las puzolanas CV-10 y CV-19:

RMF, RMC,  $\Delta$ RMF e  $\Delta$ RMC, de aumento hasta alcanzar un valor máximo tras el cual desciende notoriamente hasta la auto-destrucción (caso de la puzolana CV-19) ó no (caso de la puzolana CV-10) antes de la edad final del ensayo (caso de la puzolana CV-19 en RMF), ó no, (caso de la puzolana CV-10) de sus probetas respectivas, es decir, al igual que ocurriere con su cemento matriz acompañante (P-31) solo, aunque en este caso su auto-destrucción se verifica 180 y algo más de 365 días, antes que en el caso de las de la puzolana CV-19 y CV-10 respectivamente.

Y en cuanto a los parámetros derivados relativos  $Vc\Delta$ RMFy  $Vc\Delta$ RMCde disminución rápida, progresiva y más o menos sinuosa hasta la práctica nulidad y negatividad, o no, de los mismos antes (caso de la puzolana CV-19), o no, (caso de la puzolana CV-10) de la edad final del ensayo, aunque claro está de valores diferentes entre si y respecto a su cemento matriz acompañante respectivo solo.

- 2º.- Las clasificaciones que se obtienen a las edades fundamentales del ensayo de 1,7,14,28,365 y 730 días de las puzolanas citadas así ensayadas (y su influencia sobre la RS de su cemento portland matriz acompañante común P-31 solo, ), en función de los valores de RMF, RMC y parámetros derivados correspondientes, de sus probetas respectivas, han sido las siguientes, véase Tabla 85.

Tabla 85

Caso (etapa)	> RMF >	> RMC >
1. P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30
2. P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30
3. P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30
4. P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30
5. P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30
6. P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30
7. P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30
8. P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30
9. P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30
10. P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30	P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30 P-31/CV-10 70/30

No obstante de todas las clasificaciones obtenidas la mas interesante es la que proviene de clasificar las puzolanas así ensayadas y comparadas por la edad, de mas tarde a mas pronto, a la que alcanzan su valor máximo de RMF, RMC, ΔRMF y/o ΔRMC respectivo, la cual sería,

(N)	>	(CV-19)	=	(CV-19)	>	(P-31)	NOTA :	
RMF:	730 d.	>	180 d.	=	180 d.	>	28 d.	730 días : Fin del
RMC:	270 d.	>	180 d.	=	180 d.	>	28 d.	ensayo .-

Discusión VIII.3.3.2.3.3 (cont.)

(G) Parámetro: Porosidad, véase Tablas 28 y 45.

- 1ª.- En este caso y al igual que en los anteriores afines, las tres puzolanas se dividen en dos grupos no comparables entre si:
- uno formado por la puzolana N en la que la porosidad de sus probetas respectivas disminuye sinuosamente durante el transcurso del ensayo, y
  - otro formado por las puzolanas CV-10 y CV-19 en el que la porosidad de sus probetas respectivas aumenta sinuosamente hasta la edad final del ensayo, llegándose a romper las mismas, caso de la puzolana CV-19 a la edad de 545 días, ó no, caso de la puzolana CV-10, antes de dicha finalización.
- 2ª.- Las clasificaciones obtenidas a las edades fundamentales del ensayo que se citan seguidamente, entre ambas puzolanas comparables CV-10 y CV-19, que no la N, y respecto a su cemento portland matriz acompañante común (P-31) solo, mediante los valores de porosidad de sus probetas respectivas de mayor a menor valor ha sido la siguiente,

Edad (días)	Parámetro	Cemento (P-31) y cementos de mezcla (P-31/CV-10) y (P-31/CV-19)
14	> Poros > (%)	CV-10* > *CV-19
28		CV-10 > CV-19*
365		CV-10 > CV-19*
730		CV-10 > CV-10

Discusión VIII.3.3.2.3.3 (cont.)

(H) Parámetros: Vu, ΔVu y VcΔVu, véase Tablas 28, 30, 45 y 46.

- 1ª.- En todos los cementos de mezcla PUZ 70/30 preparados y así ensayados, la evolución de los valores de la Vu de sus probetas

respectivas, es de aumento gradativo durante el transcurso del ensayo hasta alcanzar un valor máximo,

- en el caso de la puzolana N, a la edad de 365 días,
  - en el caso de la puzolana CV-10, a la edad de 150 días,
  - en el caso de la puzolana CV-19, a la edad de 270 días, y
  - en el caso del cemento (P-31) solo, a la edad de 120 días,
- tras el cual se produce el descenso correspondiente hasta la edad final del ensayo.

2ª.- La clasificación obtenida de las puzolanas citadas así ensayadas en función de la edad a la que alcanzan el máximo valor de  $V_u$  respectivo es como sigue,

(P-31) < (P-31/CV-10 70/30) < (P-31/CV-19 70/30) < (P-31/N 70/30)  
120 d. < 150 d. < 270 d. < 365 d.

3ª.- Las clasificaciones obtenidas a las edades fundamentales del ensayo de 14, 28 y 730 días de las puzolanas citadas comparables CV-10 y CV-19, que no la N por las razones apuntadas anteriormente (y su influencia sobre los valores de  $V_u$  de las probetas del cemento (P-31) solo), en función de los valores de  $V_u$  de sus probetas respectivas, de menor a mayor por este orden, han sido las siguientes,

Edad (días)	Parámetro	(P-31), (P-31/CV-10) y (P-31/CV-19)
14	< $V_u$ <	CV-19* < *CV-10
28		CV-19* < *CV-10
730		CV-19 < CV-10*

#### Discusión VIII.3.3.2.3.3 (cont.)

(I) Parámetros:  $SO_4^{2-}$  lcp y  $V_v$ , véase Tablas 30 y 47.

1ª.- Al igual que ocurriera en el caso (a) de comparación discutido al principio de este apartado, cemento (P-1) y puzolanas D, N, O, C y M, aquí las tres puzolanas se dividen en dos grupos,

- uno, constituido únicamente por la puzolana N, en el que la cantidad de  $SO_4^{2-}$  lcp aumenta conforme transcurre el ensayo, señal de NO fijación del mismo.
- otro, constituido por las otras dos puzolanas comparadas con la anterior CV-10 y CV-19, en el que a la cantidad de  $SO_4^{2-}$  lcp correspondientes les ocurre todo lo contrario al caso anterior, es decir, aumentan conforme transcurre el ensayo, claro está - que por el motivo opuesto.

2.- La clasificación obtenida de tales cementos de mezcla, es función de la cantidad de  $SO_4^{=}$  lcp, de mayor a menor por este orden, ha sido la siguiente a partir de la edad de 14 días hasta final del ensayo,

$> SO_4^{=}$  lcp: (P-31/N 70/30) > (P-31/CV-19 70/30) > (P-31/CV-10 70/30)

aumentando la diferencia entre la N y el resto conforme transcurre el ensayo.

Por el contrario a la edad de 7 días el orden entre la N y la CV-19 se encuentra cambiado.

TABLA 91

CALIFICACION	LIMITE DE RESISTENCIA SULFATICA, LRS	
	Nº MINIMO DE MESES PARA UN CEMENTO :	
	Portland	PA y PUZ (constituidos únicamente por PóPY+Puzolóns)
RS↑ (elevada)	TRES	CINCO
RS≈ (moderada)	UNO	TRES

H-1\*45, 16% yeso

Pruebas trts 6 cm; RMF

VIII.3.3.2.3.4.- Cementos de Mezcla preparados con Cementos Portland - de contenido elevado o mediano de  $C_3A$ , el P-1 y el P-31, respectivamente, y Puzolana Común N, 60/40, en peso: Discusión e Interpretación.  
Discusión VIII.3.3.2.3.4

(E) Parámetros:  $\bar{A}L$  y  $Vcl$ , véase Tablas 26, 41, 78 y 86.

1.- En ambos cementos de mezcla PUZ preparados y así ensayados, la evolución de los valores del  $\bar{A}L$  y  $Vcl$  de sus probetas respectivas, es de aumento, el  $\bar{A}L$ , y disminución la  $Vcl$ , ambos gradativos al igual que ocurriese con sus cementos portland matrices constituyentes respectivos solos.

No obstante y en cualquier caso, lo realmente destacable de este último parámetro,  $Vcl$ , es que la mayor parte del mismo transcurre, por lo general, en todos estos casos, durante los primeros 28 días del ensayo, y dentro de ellos con mayor razón cuanto mayor es la cantidad de puzolana N presente, y viceversa.

2.- La clasificación de tales cementos de mezcla en función del valor del  $\bar{A}L$  (y  $Vcl$ ) de sus probetas respectivas, de mayor a menor por este orden, ha sido la siguiente a todas las edades del ensayo,

$\bar{A}L$ $Vcl$	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)	p.f.e.
---------------------	--------------------------------	--------

Por otra parte, y en ambos casos, tales  $\bar{A}L$  y  $Vcl$ , han resultado ser menores que los correspondientes a su cemento portland matriz constituyente respectivo (P-1) y (P-31) sólo, (excepto el primero a las edades de 7 y 14 días), y a su correspondiente  $INERTE_{RS}$  aumentando la diferencia conforme transcurría el ensayo con el aumento en el contenido de  $C_3A$  de aquél, y viceversa.

3.- En el estudio comparativo de estos cementos de mezcla citados anteriormente, y ensayados, según,

- el presente método acelerado de ensayo, H-1, y
- el método acelerado de ensayo ASTM C 452-68,

se observa como, a igualda de edad del ensayo, los valores,

- del parámetro derivado  $\frac{\bar{A}L}{g. \text{ cemento}}$ , disminuyen su mayoría hasta tornarse en minoría, con la disminución del contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz constitutivo, de este método de ensayo, H-1, a aquél, mientras que a los,

- del parámetro absoluto  $\bar{\Delta}L$ , les ocurre esto último, o sea minoría en ambos casos y método de ensayo H-1, la cual se hace mas notable aún con la disminución del contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz constitutivo.

Discusión VIII.3.3.2.3.4 (cont.)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta RMF$ ,  $\Delta RMC$ ,  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$ , véase Tablas 28, 29, 42, 43 y 44.

1ª.- En ambos cementos de mezcla citados, la evolución de los valores de los parámetros RMF, RMC,  $\Delta RMF$  e  $\Delta RMC$ , de sus probetas respectivas ha sido,

- RMF e  $\Delta RMF$ : de aumento mas o menos sinuoso hasta la edad final del ensayo a diferencia de lo que ocurriere a su cemento matriz acompañante correspondiente (P-1) ó (P-31), sólo, cuyos valores adoptaron la forma de una campana irregular,
- RMC e  $\Delta RMC$ : de aumento continuado hasta alcanzar un valor máximo a una edad final del ensayo, distinta de uno a otro, 545 días en el (P-1/N 60/40) y 270 días en el (P-31/N 60/40), es decir su curva representativa adopta la forma de una campana irregular al igual que le ocurriere a su cemento matriz acompañante correspondiente (P-1) ó (P-31), sólo, aunque de distinta forma y evolución, pues a éstos se le llegan a auto-destruir sus probetas respectivas antes de la edad final del ensayo y a quéllos no, ni a la citada edad.

Y en cuanto a los valores correspondientes de los parámetros  $Vc\Delta RMF$  y  $Vc\Delta RMC$  respectivos ha sido de disminución rápida, progresiva y más o menos sinuosa hasta la práctica nulidad de los mismos, siendo en cualquier caso los valores correspondientes a los 28 primeros días de ensayo, los mayores de todos ellos.

2ª.- Las clasificaciones obtenidas a las edades fundamentales del ensayo de 1, 7, 14, 28 y 730 días de los cementos de mezcla citados en función de los valores de los parámetros RMF y RMC, respectivamente, de mayor a menor por este orden, han sido las siguientes, véase Tabla 86.

Tabla 86

Edad (días)	RMF, $\Delta$ RMF (menos edad de 60 d.) y $V_c \Delta$ RMF a 7 días	RMC, $\Delta$ RMC y $V_c \Delta$ RMC
1	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)	(P-1/N 60/40) < (P-31/N 60/40)
7	(P-1/N 60/40) < (P-31/N 60/40)	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)
14	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)
21	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)
28	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)
60	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)
90	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)	(P-1/N 60/40) > (P-31/N 60/40)
120	(P-1/N 60/40) < (P-31/N 60/40)	(P-1/N 60/40) < (P-31/N 60/40)
:	:	:
730	(P-1/N 60/40) < (P-31/N 60/40)	(P-1/N 60/40) < (P-31/N 60/40)

Discusión VIII.3.3.2.3.4. (cont.)

(G) Parámetro : Porosidad, véase Tablas 28 y 45.

- 1<sup>a</sup>.- En ambos cementos de mezcla citados, la porosidad de sus probetas disminuye sinuosamente hasta la edad final del ensayo, diferenciándose entre si en las fechas de consecución de los mínimos y máximos de porosidad respectivos. Así se tiene que, en el (P-1/N 60/40) se alcanza el mínimo a la edad de 60 días, " (P-31/N 60/40) " " " 7 ", y " (P-1/N 60/40) " el máximo " 180 ", y " (P-31/N 60/40) " " " 21 días, diferenciándose a su vez ambos de igual modo de sus cementos matrices (P-1) y (P-31) respectivos solos, en que la porosidad no disminuye sino que aumenta de la misma manera, hasta provocarse la rotura de sus probetas, antes de ó al finalizar, el ensayo, el cemento (P-1) a la edad de 270 días y el cemento (P-31) " " 730 "
- 2<sup>a</sup>.- La clasificación obtenida a todas las edades excepto la, 14, 21 y 60, del ensayo de tales cementos de mezcla en función de los valores de porosidad de sus probetas respectivas, de menor a mayor por este orden, ha sido la siguiente:

< Poros < (%)	(P-31/ 60/40) < (P-1/N 60/40)
---------------	-------------------------------

siendo ambas mayores que las de sus cementos matrices respectivos solos hasta la edad de 270 y 120 días inclusive, respectivamente, a partir de la cual ocurre lo contrario.



Discusión VIII.3.3.2.3.3.

(H) Parámetro :  $V_u$ ,  $\Delta V_u$  y  $V_{c\Delta V_u}$ , véase Tablas 28, 30, 45 y 46.

1ª.- En ambos cementos de mezcla citados la evolución de los valores de  $V_u$  de sus probetas respectivas sufre un aumento gradativo durante el transcurso del ensayo hasta alcanzar un valor máximo a la edad común de 365 días, tras el cual se origina el descenso correspondiente hasta la edad final del ensayo.

2ª.- Las clasificaciones que se obtienen de estos cementos de mezcla a igualdad de edad fundamental del ensayo en función de los valores de este parámetro, de mayor a menor por este orden, de sus probetas respectivas, han sido las siguientes,

Edad (días)	Parámetro	Cementos (P-1/N 80/20) y (P-31/N 80/20)
14	> $V_u$ >	(P-1/N 80/20) > (P-31/N 80/20)
28		(P-31/N 80/20) > (P-1/N 80/20)
365		(P-31/N 80/20) > (P-1/N 80/20)
730		(P-1/N 80/20) > (P-31/N 80/20)

de las cuales la de la edad de 14 días, coincide íntegramente como se ve con la que se obtendría en función del contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz respectivo.

Discusión VIII.3.3.2.3.4 (cont.)

(I) Parámetro :  $SO_4^{=}$  lcp y  $V_v$ , véase Tablas 30 y 47.

1ª.- Vale aquí íntegramente la Discusión VIII.3.3.2.3.2. (I) 1ª anterior.

2ª.- La clasificación obtenida a todas las edades del ensayo de tales cementos de mezcla PA en función de la cantidad de  $SO_4^{=}$  lcp, de mayor a menor valor por este orden ha sido la siguiente:

> $SO_4^{=}$ lcp >	(P-31/N 60/40) > (P-1/N 60/40)
--------------------	--------------------------------

lo cual confirma lo anterior.

Interpretación VIII.3.3.2.3.2 y 4.

Ello se debe con toda seguridad a que a más  $C_3A$  aporte al cemento de mezcla en cuestión su cemento portland matriz constituyente P-31, más etf-1f se formará, y mayor  $\Delta L$  se originará, cuyo desarrollo y evolución con el tiempo habrá de ser más parecido al de aquél (P-31) solo conforme mayor fracción del mismo participe en el cemento de mezcla en cuestión, en detrimento de puzolana N, como así ha ocurrido en este trabajo.

Por otra parte el hecho de que por un lado la minoría, a igualdad de edad, del  $\Delta L$  de las probetas de cualquier cemento de mezcla respecto a las de aquél (P-31) solo, y por otro de que tal minoría es aún menor que la correspondiente porcentual de dicho (P-31) solo, en el supuesto de que la puzolana N actuase únicamente como un  $INERTE_{PS}$ , confirma que la puzolana N ha actuado como tal puzolana conforme más - cantidad se ha añadido de ella, dado que la diferencia entre ambos  $\Delta L$ , a igualdad de edad, ha aumentado con la adición de la misma, como así ha ocurrido en este trabajo, véase Tablas 26 y 41.

Por otra parte, el fundamento de esta interpretación se deberá conservar íntegramente a igualdad de cemento de mezcla y desigualdad apreciable en contenido de  $C_3A$  de sus cementos portland matrices constitutivos respectivos solos, como así también ha ocurrido igualmente entre los cementos (P-1/N 80/20) y (P-31/N 80/20), véase Tablas 26 y 41.

Y en cuanto a lo ocurrido con los valores de las RMF y RMC correspondientes a la familia (P-31/N) se puede decir que ello es la confirmación una vez más del efecto protector o anti-ataque selenitoso que muestra la puzolana silícica N, dificultando el trasiego iónico necesario y suficiente para que aquél no se produzca. Por otra parte el hecho acaecido de la coincidencia de fechas en alcanzarse en las probetas correspondientes de los tres cementos de mezcla hermanos los valores máximos y/o mínimos principales y/o secundarios de los parámetros RMF, RMC,  $\Delta RMF$  e  $\Delta RMC$ , confirma el hecho de que, al parecer, la relación ett-lf total a formar en el 80/20 / cantidad total de  $SiO_2^{R-}$  del 80/20, ya debe ser la suficiente para impedir notoriamente el ataque selenitoso citado, hasta el punto de que las probetas de su cemento portland matriz correspondiente (P-31) solo, se auto-destruyen antes de finalizar el ensayo, y aquellas ni a dicha edad citada; siendo todo ello coincidente con los resultados correspondientes obtenidos mediante el método de L-A, en el caso de las tres tortas correspondientes a la puzolana también silícica D (las de las N, L-A, no se han hecho en este trabajo por no ser necesario) han permanecido intactas a lo largo del ensayo, véase Tabla 19.

Y referente a la discusión siguiente, VIII.3.3.2.3.2, (E), 2ª, se puede decir que la primera parte de la misma confirma una vez más la mayor sensibilidad del parámetro RMF sobre el parámetro RMC,

mientras que la segunda indica que la mayor presencia de  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  en el cemento de mezcla (P-31/N 60/40) sobre el resto de los hermanos, debe originar mayor cantidad de geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2^{\text{r-}}}$  los cuales podrán dificultar más y mejor la menor cantidad total de  $\text{ett-lf}$  a formar por el mismo, haciendo con ello que la creación de RM sea mayor, pues en el caso contrario y por la causa opuesta la nocividad de la misma consiguientemente habrá de ser mayor con merma en RM y aumento del  $\Delta\bar{L}$ , como así ha ocurrido en este trabajo; y si dicha puzolana N no estuviera presente, tales valores aún deberían ser menores, pues la  $\text{ett-lf}$  total a formar no se vería impedida por nada para originarse, como así ha ocurrido en este trabajo con los valores de las probetas correspondientes a su cemento portland matriz constitutivo (P-31) solo.

Por otra parte el hecho de que tanto los valores de los parámetros absolutos como derivados de la RMF y RMC disminuyan con la adición de puzolana N a la edad de 1 día, confirman el hecho de la participación notable del  $\text{C}_3\text{A}$  de la fracción cemento portland matriz, P-31 respectiva, originando  $\text{ett-lf}$  en la consecución de los mismos, y siendo para entonces dicha  $\text{ett-lf}$  no nociva y si todo lo contrario; por ello la causa ha de estribar en las probabilidades de reparto de la escasa agua de amasado ya citada, a propósito anteriormente, la cual hidratará mas a la fracción cemento portland matriz P-31 que a la fracción puzolana N.

Y en cuanto a que los valores de RMF de las probetas de cada cemento de mezcla oscilen suavemente a lo largo del ensayo pero siempre en aumento, mientras que los correspondientes de RMC no, es decir, primero aumenten y después desciendan muy poco a poco y suavemente hasta la edad final del ensayo, podría ser debido a que la  $\text{ett-lf}$ , a diferencia de los  $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$  y  $\text{CSH}$  I y II, poseería propiedades colmatantes de los estuches vítreos de las puzolanas mas que enlazantes. De aquí que al descender el pH del medio, su  $[\text{CaO}]$ , y/o cantidad de  $\text{SO}_4^{\text{r-}}$  lcp, podría hacer rebajar su presencia como tal, pudiendo ello afectar quizás en alguna medida a los valores de RMC que podrían descender ligeramente -que es lo ocurrido en este trabaj- (y del mismo modo a los correspondientes de porosidad y Vu), y no tanto a los de RMF pues éstos dependerían mas que aquéllos, del resto de los hidratos ( $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$  principalmente) de estabilidad mayor, por lo general, que la  $\text{ett-lf}$ .

Y referente al hecho de que la  $\text{Vc}\Delta\text{RMF}$  y  $\text{Vc}\Delta\text{RMC}$  del cemento portland matriz (P-31) solo correspondiente sea menor que la de sus cementos de mezcla citados con puzolana N, indica que el mayor poder de imbibición de  $\text{H}_2\text{O}$  de conservación de las probetas de estos últimos sobre las de aquél hará que el  $\text{C}_3\text{A}$  de aquellas se hidraten mas rápidamente que los de éste con las consecuencias citadas correspondientes.

Confirmándose todo lo anterior mediante el resto de los parámetros, pues por ejemplo y en el caso de la porosidad se tiene que,

- el hecho, por un lado, de que los tres cementos de mezcla ensayados alcancen su mínima porosidad respectiva a igual edad, indica que la Vf de la ett-lf, debe ser idéntica en los tres casos, y
- el hecho de que a partir de dicha edad común de consecución del mínimo anterior, se haya alcanzado el máximo de porosidad correspondiente tanto más pronto cuanto menor es la fracción cemento portland matriz acompañante (P-31), debe indicar que la misma prácticamente se ha debido totalizar antes,
  - . por haber menos  $C_3A$  en sus probetas, al tener menor fracción de cemento portland matriz P-31, y
  - . porque al haber más puzolana N, o sea más poros, es decir mayor hidratación, antes y en su totalidad se podrá hidratar selenitosamente aquél, luego antes se deberá manifestar su máxima expansividad y consiguientemente porosidad derivada.

Todo ello indica lógicamente que a más puzolana N añadida más poros tiene su probeta respectiva como así ha ocurrido en este trabajo.

Por otra parte el aumento de porosidad tan espectacular habido en el cemento portland matriz (P-31) solo, se ha de deber forzosamente a la ett-lf que continúa formándose,

- al haber  $C_3A$  y  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  suficientes para ello, pues un 7,02% de  $C_3A$  del P-31 necesitaría para pasar a ettringita, un 14,46% de  $SO_3$ , y se ha puesto inicialmente como agresivo un 21,0%
- y no existir puzolana silícica alguna que se lo dificulte.

#### Interpretación VIII.3.3.2.3.3.

La causa de ello ha de ser debido una vez más al "distinto" contenido de  $Al_2O_3^{r-}$  de las puzolanas, CV-10 y CV-19 comparadas y así ensayadas, ya que al tener que ser constante la cantidad de ett-lf de la fracción P-31 que las acompaña, las discrepancias habidas han de ser forzosamente achacables a la fracción puzolana correspondiente y en ella y con ella a la  $Al_2O_3^{r-}$  aportada por cada una de ellas en cada caso, y por tanto a la ett-rf correspondiente que de ellas se originen.

Y en cuanto a las similitudes y discrepancias habidas entre ambas puzolanas, en los tres métodos de ensayo, se puede decir que

probablemente porque en este ensayo H-1 concurren dos circunstancias que no se producen en aquellos L-A y ASTM C 452, como son:

- a) que al ser mortero, el sistema dispondrá globalmente de un menor tiempo de saturación de portlandita en su fase líquida y por lo tanto no podrá llegar a ser jamás tan peligroso en modo y forma que en la torta, máxime si la probeta está sumergida en agua y la torta no, pues de ese modo aquella podrá lixivarse y precipitar como  $\text{CO}_3\text{Ca}$  en el fondo del recipiente, como así ocurre en la realidad a partir de las edades finales del ensayo.<sup>2\*</sup>
- b) que al disponer de bastante más  $\text{SO}_3$  agresivo que el ASTM C 452, se podrá formar toda la ettringita posible de ambos orígenes  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ ; y al ser constante la primera, las diferencias habidas habrán de ser achacables a la segunda, de aquí que tales puzolanas habrán de tener contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  diferentes, con mayoría de la primera, o sea de la CV-10 sobre la CV-19, o al menos bastante más reactiva.

Con lo que finalmente se puede decir que las diferencias habidas entre las puzolanas N, CV-10 y CV-19 han de deberse:

- a) en el caso de la puzolana N, por ser "silícica", y
- b) en el caso de las puzolanas CV-19 y CV-10, porque pese a tener una suma de A + F ( $\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) algo similar (46,21% contra 33,85%), sus MF ( $\% \text{Al}_2\text{O}_3 / \% \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) respectivos son muy dispares lo cual se habrá de traducir en una menor cantidad de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , por unidad de peso, en su cemento de mezcla correspondiente en la CV-19 que en la CV-10, y con ello la posibilidad de poder originar una mayor cantidad de ettringita expansiva y ésta un mayor  $\Delta L$  en sus probetas,<sup>4\*</sup> como así ha ocurrido en este trabajo. Y todo ello a diferencia de la elección que Alonso Ramírez realizase al efecto en su trabajo de Tesis Doctoral (291).

No obstante y por otra parte cabe destacar que pese a ser, al parecer, la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la puzolana CV-10 superior a la de la CV-19, la de ésta parece ser más reactiva puesto que su creación, desarrollo y evolución a lo largo del ensayo es más parecida a la de M, que es la aluminica de referencia empleada; mientras que la de la puzolana CV-10 se parece más a la del  $\text{C}_3\text{A}$  de cualquier cemento portland.

Por otra parte se puede decir que aunque las distintas clasificaciones obtenidas de las mismas a las edades iniciales y/o finales del ensayo apunten en principio a hechos diferentes acaecidos, ambas son consecuencia directa de un mismo fenómeno. Y es que al tener las puzolanas CV-10 y CV-19 cantidades notables de ión  $\text{Al}^{3+}$  (en distintas formas más o menos cristalinas), expresadas como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (%)

mayores incluso que la M, y no haber originado RMF y RMC, a las edades iniciales del ensayo, mayores que las que ésta originó con el cemento portland matriz acompañante PY-4 ó PY-6 en proporción 80/20, pese a poder existir sinergismo en aquellas con el  $C_3A$  de su fracción cemento portland matriz acompañante (P-31), ello indica que ambas deben tener  $Al_2O_3^r$ , pero en cantidades menores que la M. Y si por otra parte a la edad de 14 días las RMF y RMC de las probetas del cemento de mezcla (P-31/CV-10 70/30) han sido mayores que las de su cemento portland matriz acompañante (P-31) solo, entre sus  $Al_2O_3^r$  y  $C_3A$  respectivos debe de haber habido sinergismo, hecho no posible con la CV-19 por la razón contraria. De aquí que la  $Al_2O_3^r$  de la puzolana CV-10 deba de ser mayor que la de la puzolana CV-19 y las de ambas mayores lógicamente, que la de la N.

Este hecho puede dar lugar a que al poder fijar el cemento de mezcla (P-31/CV-10 70/30) más  $SO_3$  del 21,0 % de  $SO_3$  total inicial, que su homónimo de la puzolana CV-19, deberá quedarle menos  $SO_3$  residual para originar el 1% del  $C_3A$  residual de su fracción cemento portland matriz acompañante P-31, debiendo ocurrir para entonces todo lo contrario que en su homónimo de la puzolana CV-19. De aquí que a las edades posteriores, las fracciones de cemento portland matriz P-31 de aquí, puedan resistir mejor la agresividad de una menor cantidad de  $SO_3$  residual, dado además su probable menor contenido de  $C_3A$  que las del segundo; y ambas lógicamente más que las de su cemento portland matriz acompañante (P-31) solo, cuyas probetas deberán alcanzar su valor máximo correspondiente y/o auto-destruirse lógicamente antes, que las de los de mezcla (P-31/CV-19 70/30) y (P-31/CV-10 70/30), por este orden, como así ha ocurrido en este trabajo, véanse Tablas 28 y 42, de los tres, (P-31), con CV-10 y con CV-19; siendo además todo ello coincidente con los resultados similares obtenidos en ambos cementos de mezcla en el método L-A.

En cambio las probetas del cemento de mezcla (P-31/N 70/30) no se deberán auto-destruir en los dos años de duración del ensayo por la presencia de la puzolana impedidora N por las razones apuntadas al respecto anteriormente, como así también ha ocurrido en este trabajo, véase Tabla 41.

Este último hecho deberá dar por consecuencia que a las edades finales del ensayo, las RMF y RMC de las probetas de este último cemento de mezcla (P-31/N 70/30) tengan que ser notoriamente mayores

que las de sus homónimas preparadas con las puzolanas CV-10 y CV-19 y que las de su cemento portland matriz acompañante (P-31) solo, como así ha ocurrido también en este trabajo, véase Tablas 28 y 42 correspondientes.

Todo ello se confirma además mediante los valores correspondientes del resto de los parámetros empleados, de aquí que por ejemplo la porosidad también demuestre las diferencias fisico-químicas notables existentes, y sus diferentes comportamientos, entre la puzolana silícica N, y las puzolanas evidentemente "no silícicas" CV-10 y CV-19. De aquí que la primera dificulte químicamente la formación de  $\text{etf-lf}$  y quizás también físicamente, por las razones apuntadas en la interpretación anterior, mientras que las segundas la faciliten, al igual que ocurriera prácticamente con la C y M (P-1/C 60/40) y (P-1/M 60/40), ya estudiadas con el cemento portland matriz acompañante P-1 (más próximo, en comportamiento ante el ataque del ión  $\text{SO}_4^{=}$ , al cemento (P-31), que este del (PY-4) ó (PY-6).

De todo lo cual cabe deducir que tal analogía podría ser, según esto último CV-19 y C, y CV-10 y M, lo cual resultaría totalmente coincidente con la que se obtendría en función de sus M.F. respectivos, véase Tabla 11, es decir:

1,87, CV-19 < 6,44, C < 7,02, CV-10 < 19,42, M

Y en cuanto a lo ocurrido entre los cementos (P-1/N 60/40) y (P-31/N 60/40), se puede aplicar en todo o en parte las razones dadas para el caso primero entre el (P-31/N 80/20), (P-31/N 70/30) y (P-31/N 60/40) (párrafo segundo de la interpretación VIII.3.3.2.3.2,4). Por lo tanto a las edades iniciales del ensayo, a igualdad de hidratación selenitosa por igualdad de porosidad de origen puzolana N, deberá originarse, según las interpretaciones VIII.2.2.1 y VIII.3.3.1., mayores RM conforme mayor sea el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento portland matriz acompañante respectivo, en este caso el P-1 (14,11%  $\text{C}_3\text{A}$ ), como así ha sucedido en este trabajo. No obstante el hecho de que el cemento de mezcla (P-1/N 60/40) alcance su máximo valor respectivo de RMC después que el (P-31/N 60/40), cuando en teoría debería ser antes, puede explicarse mediante el hecho de que la constancia de cantidad de  $\text{SiO}_2^{\text{F-}}$  de la puzolana N en ambos casos, deberá provocar parecida dificultad -incrementable en semejanza conforme transcurre el ensayo -, al trasiego iónico, por lo que a partir de la edad de 28 días en adelante la consecución de ulteriores valores mayores de RM debe ser función de la cantidad que se hidrate del  $\text{C}_3\text{A}$  anhidro

residual según las interpretaciones anteriores, la cual dependerá lógicamente de aquellos  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}$  mas que de la cantidad total absoluta de  $\text{C}_3\text{A}$  anhidro existente en cada momento, por lo que la hidratación selenitosa de la totalidad del mismo se verá retrasada en el tiempo por aquellos y consiguientemente la consecución de los máximos valores posibles de RM derivados correspondientes, como así ha sucedido en este trabajo. Debiendo por tanto llegar a ocurrir todo lo contrario a partir de la edad de dicho máximo valor de RM o quizás algo después en adelante, como así también ha ocurrido en este trabajo.

Finalmente el hecho acaecido de que los valores del parámetro RMF no hayan secundado lo anterior y si solo los de RMC correspondientes, confirman la posibilidad de que la ett-lf por su expansividad natural sea más colmatante que enlazante lo cual afectaría más a las RMF que a las RMC correspondientes, como así ha sucedido en este trabajo.

-----  
NOTAS :

- \* Como tal ett-lf, para pasar a  $\text{C}_x\text{A}_y\text{H}_z$  según las características de la fase líquida que la circunda.
- 2\* Aunque no TODA la que podría provenir de la fracción cemento P ó PY de la probeta, prueba de ello es la permanencia de la misma, como tal, en el tiempo, cuando ha resistido el ataque selenitoso tan severo.
- 3\* Ni aún después, como ha sido el caso.
- 4\* Que las de la CV-10.



VIII.3.3.2.3.E.- Cementos de Mezcla preparados con Cemento Portland de contenido escaso o prácticamente nulo de  $C_3A$ , el PY-1, el PY-4 y el PY-6 respectivamente, y Pozzolana común M, 80/20 en peso:

Discusión VIII.3.3.2.3.E

(E) Parámetros:  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$ , véase Tablas 26, 41, 56 y 78.

1ª.- En todos los cementos de mezcla PA preparados y así ensayados, la evolución de los valores del  $\bar{\Delta L}$  y  $V_{cl}$  de sus probetas respectivas, es de aumento, el  $\bar{\Delta L}$ , y disminución la  $V_{cl}$ , ambos gradativos al igual que ocurriese, en la forma que no en su cuantía, con sus cementos portland matrices constituyentes respectivos solos.

No obstante y en cualquier caso, lo realmente destacable de este último parámetro,  $V_{cl}$ , es que la mayor parte del mismo transcurre en todos estos casos durante los primeros 28 días del ensayo, y dentro de ellos con mayor razón cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante respectivo PY solo.

2ª.- Las clasificaciones de tales cementos de mezcla en función del valor del  $\bar{\Delta L}$  (y  $V_{cl}$ ) de sus probetas respectivas, de mayor a menor por este orden, ha sido la siguiente a todas las edades del ensayo,

$\bar{\Delta L}$ $V_{cl}$	$>$	(PY-1/M 80/20) $>$ (PY-4/M 80/20) $>$ (PY-6/M 80/20)	p.f.e.
------------------------------	-----	--	--------

Por otra parte y en todos los casos, a igualdad de edad del ensayo, dicho  $\bar{\Delta L}$  ha sido siempre notablemente superior que el de su cemento portland matriz respectivo solo, y correspondiente INERTE<sub>RS</sub>, aumentando la diferencia entre ambos con el contenido de  $C_3A$  del mismo.

3ª.- En el estudio comparativo de los cementos de mezcla citados anteriormente, y ensayados según

- el presente método acelerado de ensayo, H-1, y
- el método acelerado de ensayo ASTM C 45-68,

se observa como, a igualdad de edad del ensayo, los valores del parámetro derivado  $\frac{\bar{\Delta L}}{g. \text{ cemento}}$ , y absoluto  $\bar{\Delta L}$ , aumentan su notable mayoría, en este caso, del H-1, respecto de aquél, ASTM C 452-68,

- con el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz constituyente respectivo PY, y
- con el transcurso del ensayo.

4.- Finalmente y como compendio general de los apartados anteriores correspondientes a los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, y los 25 de mezcla PA y PUZ, ensayados mediante este método H-1, cabe citar que de entre estos últimos,

- 14 (56,00%), han resultado ser de elevada RS, puesto que el  $\bar{\Delta L}_{28d} \leq 0,044\%$ , según la Tabla 73, y el párrafo final de la interpretación VIII.3.3.1, y
- 11 (44,00%), han resultado ser de baja o escasa RS, puesto que el  $\bar{\Delta L}_{28d} \leq 0,095\%$ , según las referencias anteriores.

Discusión VIII.3.3.2.3.5 (cont.)

(F) Parámetros: RMF, RMC,  $\Delta$ RMF,  $\Delta$ RMC,  $Vc\Delta$ RMF y  $Vc\Delta$ RMC, véase Tablas 28, 29, 58, 60, 62, 64 y 87.

1.- En todos los cementos de mezcla PA preparados y así ensayados, la evolución de los valores de los parámetros RMF, RMC,  $\Delta$ RMF e  $\Delta$ RMC de sus probetas respectivas, ha sido de aumento progresivo y continuado hasta alcanzar un valor máximo a una edad dada, variable de uno a otro, tras el cual se produce el descenso correspondiente hasta la rotura de sus probetas respectivas a una edad dada, variable también de uno a otro, pero que en cualquier caso es antes de la edad final del ensayo de 730 días; es decir, las curvas representativas correspondientes adoptan la forma de una campana mas o menos regular según el cemento de mezcla y el parámetro empleado. Todo ello y para el caso del cemento de mezcla (PY-1/M 80/20), al igual que le ocurriere a su cemento matriz acompañante (PY-1) solo, aunque distinto en cuantía y evolución, y (PY-4/M 80/20) ó (PY-6/M 80/20), a diferencia de lo que le ocurriere a sus cementos matrices (PY-4) ó (PY-6) solos respectivos.

Y en cuanto a los valores de los parámetros  $Vc\Delta$ RMF y  $Vc\Delta$ RMC respectivos, ha sido de disminución rápida, progresiva y mas o menos sinuosa hasta la práctica nulidad y/o negatividad de los mismos, pero cuyo máximo valor se origina siempre durante los primeros 28 días del ensayo. No obstante lo que si resulta de interés es la clasificación que se obtendría de tales cementos de mezcla preparados, en

función de las edades, de mas pronto a mas tarde, a las que alcanzan los valores máximos de RMF o RMC, sus probetas respectivas, que serian

RMFmáx. (PY-1/M 80/20) < RMFmáx. (PY-6/M 80/20) < RMFmáx. (PY-4/M 80/20)  
 28 d. < 60 d. < 90 d.  
 RMCmáx. (PY-1/M 80/20) < RMCmáx. (PY-6/M 80/20) < RMCmáx. (PY-4/M 80/20)  
 60 d. < 90 d. < 150 d.

2.- Las clasificaciones obtenidas, a las edades fundamentales del ensayo de los cementos de mezcla citados, en función de los valores de los parámetros RMF y RMC respectivamente, de mayor a menor, por este orden, han sido las siguientes, véase Tabla 87.

Tabla 87

Edad (días)	> R M F >	> R M C >
1	(PY-6/M 80/20) > (PY-1/M 80/20) > (PY-4/M 80/20)	(PY-6/M 80/20) > (PY-1/M 80/20) > (PY-4/M 80/20)
7	(PY-6/M 80/20) > (PY-4/M 80/20) > (PY-1/M 80/20)	(PY-4/M 80/20) > (PY-1/M 80/20) > (PY-6/M 80/20)
14	(PY-4/M 80/20) > (PY-6/M 80/20) > (PY-1/M 80/20)	(PY-4/M 80/20) > (PY-6/M 80/20) > (PY-1/M 80/20)
21	" " "	" " "
28	" " (PY-1/M 80/20)	" " "
50	" (PY-6/M 80/20) "	" " (PY-1/M 80/20)
90	(PY-4/M 80/20) " "	" (PY-6/M 80/20) "
150	" " "	(PY-4/M 80/20) " "

( ) valor máximo alcanzado de RMF ó RMC

#### Discusión VIII.3.3.2.3.5 (cont.)

(G) Parámetro: Porosidad, véase Tablas 28, 45 y 64.

1.- En los tres casos comparados, la evolución de la porosidad de sus probetas respectivas, aumenta sinuosamente durante el transcurso del ensayo hasta dar con la rotura de las mismas mucho antes de que finalizase el mismo y tanto mas pronto, 270 días, cuanto mas C A tiene el cemento matriz acompañante, en este caso el PY-1, de aquí que en el caso de los que los cementos matrices acompañantes han sido el PY-4 ó el PY-6, la edad de rotura ha sido de 545 días en ambos, es decir, el doble de tiempo mas tarde que el del cemento matriz acompañante PY-1.

Y todo ello al contrario de lo que ocurriere con sus cementos matrices correspondientes (PY-1), (PY-4) ó (PY-6) solos, donde la porosidad de sus probetas disminuye primeramente, y aumenta después, en bastante menor cuantía hasta la edad final del ensayo.

- 2ª.- La clasificación que se obtiene en función de este parámetro de los tres cementos de mezcla PA citados varía según la edad del ensayo que se considere, no obstante y en cualquier caso, es bastante difícil, puesto que los valores de porosidad respectivos a igualdad de edad, excepto en origen y la de 7 días, son relativamente del mismo ó parecido orden de magnitud, aunque estando quizás casi siempre los del (PY-1/M 80/20) en ligera mayoría.

Lo único común en este estudio comparativo es que durante todo el ensayo la porosidad de las probetas de cada cemento matriz solo, es siempre menor que las de su cemento de mezcla respectivo. No obstante la diferencia entre ambos valores a cualquier edad ha resultado ser, por lo general, tanto menor, cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del cemento PY respectivo, es decir,

< Poros <	(PY-1/M 80/20) - (PY-1) < (PY-4/M 80/20) ó (PY-6/M 80/20) - - (PY-4) ó (PY-6), respectivamente.
-----------	--

#### Discusión VIII.3.3.2.3.5 (cont.)

(H) Parámetros: Vu,  $\Delta Vu$  y  $Vc\Delta Vu$ , véase Tablas 28, 29, 45, 46, 64 y 66.

- 1ª.- En tales cementos de mezcla la evolución de la Vu de su respectiva probeta sufre un aumento gradativo durante el transcurso del ensayo hasta alcanzar un valor máximo a edad variable, de modo y manera que la clasificación de los mismos en función de la misma, de mas pronto a mas tarde, sería,

(PY-4/M 80/20) < (PY-6/M 80/20) < (PY-1/M 80/20)  
60 d.      <      90 d.      <      120 d.

y tras el cual se origina el descenso correspondiente hasta la auto-destrucción de la probeta respectiva alcanzada tanto mas pronto cuanto mas  $C_3A$  tien el cemento PY-, en este caso el PY-1.

- 2ª.- La clasificación que se obtendría de tales cementos de mezcla a igualdad de edad fundamental del ensayo en función de los valores de este parámetro, de mayor a menor, por este orden, de su probeta respectiva, sería,

Edad	Parámetro	Clasificación de los cementos de mezcla (PY-1 ó PY-4 ó PY-6/M 80/20) en f (Vu) de sus probetas respectivas.
14	> Vu >	(PY-6/M 80/20) > (PY-1/M 80/20) > (PY-4/M 80/20)
28		(PY-4/M 80/20) = (PY-1/M 80/20) > (PY-6/M 80/20)
120		(PY-1/M 80/20) > (PY-6/M 80/20) > (PY-4/M 80/20)
180		(PY-6/M 80/20) > (PY-4/M 80/20) > (PY-1/M 80/20)

que demuestra como a 120 días en el cemento (PY-1/M 80/20) es en el que ha habido mas sinérgismo entre el  $C_3A$  de la fracción PY-1 y la  $Al_2O_3^r$  de la fracción puzolana M.

#### Discusión VIII.3.3.2.3.5 (cont.)

(I) Parámetros:  $SO_4^{=}$  lcp y Vv, véase Tablas 30, 47 y 69.

1ª.- En los tres casos comparados, la evolución de los contenidos de  $SO_4^{=}$  lcp en cada caso, es totalmente opuesta a la de su cemento portland matriz sólo, es decir, disminuye con el transcurso del ensayo, señal inequívoca de la existencia de un "consumo" o "fijación" en este caso mayoritaria por parte de la puzolana M puesto que la aportación de  $C_3A$  al sistema por parte de su cemento PY respectivo, es más baja o prácticamente nula.

2ª.- La clasificación obtenida de tales cementos de mezcla en función de la cantidad de  $SO_4^{=}$  lcp de mayor a menor, por este orden, ha sido la siguiente a todas las edades del ensayo,

$> SO_4^{=}$ lcp	$>$	(PY-4/M 80/20) > (PY-6/M 80/20) > (PY-1/M 80/20); p.f.e.
------------------	-----	--

#### Interpretación VIII.3.3.2.3.5

Probablemente ello se deba a la acción sinérgica que se suele producir en tales casos entre la  $ett-rf$  de origen M y la  $ett-lf$  de origen  $C_3A$ , el cual sólo se podrá producir en aquél cemento de mezcla de los comparados que posea  $C_3A$ , porque su cemento portland matriz acompañante PY se lo aporte al tenerlo también, como así ha ocurrido con el PY-1 en este trabajo.

Y como confirmación de lo dicho está en que la diferencia entre el  $\bar{4}L$  del (PY-1/M 80/20) y el 80% del  $\bar{4}L$  del (PY-1) sólo,

ha resultado ser bastante superior a cualquier edad que la correspondiente a las de los cementos (PY-4/M 80/20) y (PY-6/M 80/20),

y ello únicamente se puede deber a la escasa pero suficiente aportación de  $C_3A$  por parte de la fracción de PY-1, para provocar la potenciación necesaria de efectos expansivos y la acción sinérgica correspondiente junto con la fracción de puzolana M, es decir, a la mayor proximidad en este caso del cociente  $\frac{Al_2O_3(\%)}{C_3A(\%)}$  adecuado para tal fin.

Por otra parte y en cuanto a los parámetros RMF y RMC se puede decir que aquí valen íntegramente las interpretaciones respectivas dadas para cada caso concreto en los apartados correspondientes de interpretaciones anteriores, con la diferencia de que en este caso la puzolana común es la M y no la N, con la posibilidad de existencia del sinérgismo consiguiente, en su caso. De aquí que la diferencia de edad existente entre la auto-destrucción de las probetas respectivas, puede ser achacable al hecho posible de la probable mayor acción sinérgica habida, dentro de lo escasa, por la mayor et-T-Total originada en el caso del cemento de mezcla (PY-1/M 80/20) que en el caso de los cementos de mezcla (PY-4/M 80/20) y/o (PY-6/M 80/20), lo cual redundaría en mayor nocividad y menor durabilidad de las probetas respectivas (consecución de los máximo valores posibles de RMF y RMC, y rotura de las mismas, a edades mas tempranas) de aquél sobre las de éstos, como así ha ocurrido en este trabajo, véase Tablas 41 y 56.

Por último la clasificación obtenida en función de las edades correspondientes de consecución de los valores máximos de RMC de sus probetas respectivas, es una consecuencia lógica de la razón dada anterior.

No obstante esta hipótesis no es válida para poder explicar las diferencias habidas entre las probetas del (PY-4/M 80/20) y (PY-6/M 80/20), ya que las mismas podrían deberse a idéntica causa apuntada para igual caso en el método L-A y ASTM (41), es decir a la mayor disponibilidad de  $C_3S$  del segundo sobre el primero, con sus consecuencias correspondientes allí citadas.

Y todo lo ocurrido con el resto de los parámetros viene a abundar sobre la razón dada anteriormente.

Finalmente, véase el párrafo final de la interpretación VIII. 1.2.2.3.

VIII.3.3.2.3.6.- Ejemplos Prácticos de los Ocho Cementos Pozolánicos Industriales elegidos al azar para la realización de este trabajo, y ensayados según el método - HIBRIDO-1, véase Tablas 73 y 74.

Discusión e Interpretación VIII.3.3.2.3.6.

1ª.- Según este método de ensayo HIBRIDO-1 los ocho cementos de mezcla PUZ industriales elegidos al azar para la realización de este trabajo, y así ensayados, (H-1), han resultado tener también distinto comportamiento según el método de ensayo en cuestión de modo y manera que según el mismo TODOS ellos, se pueden calificar de "no elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, en general, y de calcio (yeso), en particular" puesto que el valor del  $\bar{\Delta L}_{28d.}(\%)$  de sus probetas respectivas ha resultado ser siempre y en todos los casos mayor 0,044% a la edad de 28 días, de las mismas, según la propuesta de especificación realizada para estos cementos de mezcla PA y PUZ al final de la interpretación VIII.3.3.1. Tabla 75.

No obstante y puesto que dicho valor del  $\bar{\Delta L}_{28d.}(\%)$  de cada grupo de 6 probetas, ha resultado asimismo ser diferente de uno a otro, se puede decir con fundamento que el grado de resistencia al mencionado ataque agresivo del cemento PUZ que las constituye en cada caso, varía de uno a otro, de modo y manera que, según la propuesta de especificación realizada también al final de dicha interpretación VIII.3.3.1, ningún cemento de mezcla PUZ industrial citado se podría calificar tampoco de moderada resistencia al ataque de los iones sulfato, en general, y de calcio (yeso), en particular, puesto que el valor del  $\bar{\Delta L}_{28d.}(\%)$  de sus probetas respectivas ha resultado ser siempre y en todos los casos mayor del 0,095%

Ello no resulta concordante con igual caso correspondiente al método de ensayo de L-A, y si en cambio resulta concordante con igual caso correspondiente al método de ensayo ASTM C 452-68.

2ª.- Vale aquí íntegramente la parte afín de la interpretación VIII.2.2.2.9 correspondiente a igual caso comparativo con este método H-1, pudiéndose destacar en esta ocasión que existe una gran concordancia con la correspondiente clasificación obtenida

- mediante el método de L-A, con la única excepción del cemento PUZ-8, y

- mediante el método ASTM C 452-68, a la edad de 28 días.

3ª.- Vale aquí íntegramente la interpretación VIII.1.2.2.5,3ª correspondiente a igual caso clasificatorio obtenido mediante el método L-A, lo cual garantiza en esta ocasión la aceptable fiabilidad de su diagnóstico derivado de los valores correspondientes a la edad de 28 días, facilitando y certificando de este modo la posibilidad real de aplicación aceptablemente fiable a los cementos de mezcla PA y PUZ.

4ª.- Vale aquí íntegramente las discusiones e interpretaciones VIII.2.2.2.9, 4ª y 7ª correspondientes a igual caso en el método ASTM C 452-68.

5ª.- En este caso, el valor de la relación  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$  osciló entre 0,555 y 0,560.

6ª.- Véase el párrafo final correspondiente a la interpretación VIII.1.2.2.4.

#### VIII.3.3.3.- Comentario Final

Como compendio del estudio comparativo llevado a cabo entre los tres métodos de ensayo empleados, L-A, ASTM C 452 e H-1, se puede decir con fundamento que la evolución de los valores de los respectivos parámetros empleados, y en especial,  $\Delta\phi$ ,  $\bar{\Delta}L$ , RMF, RMC y Porosidad, se deduce fácilmente que el método HIBRIDO-1 aún con sus propias imperfecciones, ha conseguido aunar,

- la pedagogía y severidad, principalmente, del método de L-A, y
- la sencillez, versatilidad, rapidez de respuesta y economía, principalmente, del método ASTM C 452,

debiendo lógicamente tener idénticos detractores y defensores que el L-A, según el sector de la construcción y sus industrias afines que se considere.

Todo ello por tanto viene a confirmar,

- la razonabilidad de la hibridación realizada, y
- el nombre de HIBRIDO-1 adjudicado a la misma,

lo cual no significa en absoluto la proposición EXACTA del mismo, aunque si su FUNDAMENTO, como es que el contenido de yeso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , expresado como  $\text{SO}_3$  (%), de la mezcla-conglomerante cemento a ensayar mas yeso, sea netamente superior al 7,0% empleado por el método ASTM C 452 por las razones aducidas en su momento. Tal mayor contenido deberá estar comprendido entre el 14,0% y el 21,0% de  $\text{SO}_3$ , según además los trabajos afines anteriores (290). Por lo que para el del



21,0% de  $SO_3$  se ha propuesto el de HIBRIDO-1, para el del 14,0% de  $SO_3$  se propone el de HIBRIDO-2, y en su caso y por su posible interés, para el del 15,0% (15,05% de  $SO_3$  posee el L-A), se propone el de HIBRIDO.2

TABLA 80

CLASIFICACION DE LAS PUZOLANAS S.N.S.A.C.Y.M. COMPARADAS ENTRE SI Y RESPECTO DE SU CEMENTO PORTLAND MATRIZ ACOMPAÑANTE RESPECTIVO PóPY (M) SOLO EN (15,0%) DE MENOR A MAYOR VALOR. [H-1]		
EDAD (días)	PARA-METRO	CEMENTOS DE MEZCLA PUZ(P)/PUZOLANA X 60/40 EN PROBE-TAS DE MORTERO SELENTOSO (21,0% SO <sub>3</sub> ) 1:2,75 DE (15,0%)
7	AL (%) PROBETAS (15,0%)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
14		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
28		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
365		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
730		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
EDAD (días)	PARA-METRO	CEMENTOS DE MEZCLA PA(PY-4)/PUZOLANA X 80/20 EN PROBE-TAS DE MORTERO SELENTOSO (21,0% SO <sub>3</sub> ) 1:2,75 DE (15,0%)
7	AL (%) PROBETAS (15,0%)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
14		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
28		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
365		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
730		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
EDAD (días)	PARA-METRO	CEMENTOS DE MEZCLA PA(PY-6)/PUZOLANA X 80/20 EN PROBE-TAS DE MORTERO SELENTOSO (21,0% SO <sub>3</sub> ) 1:2,75 DE (15,0%)
7	AL (%) PROBETAS (15,0%)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
14		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
28		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
365		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
730		(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
CLASIFICACION DE LAS DISTINTAS PUZOLANAS EMPLEADAS EN (PARAMETROS QUIMICOS)		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	D < N < O < A < C < M	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,91 < 6,42 < 13,84 < 19,36 < 20,20 < 23,11	
SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,80 < 1,46 < 1,00 < 1,61 < 6,44 < 9,42	
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	46,07 > 10,10 > 3,26 > 2,14 > 2,70 > 3,18	
PRATON CON P-1 (20,00 SO <sub>3</sub> (M/1))	D > C > A > N > O	

TABLA 81

CLASIFICACION DE LAS PUZOLANAS D.N.O.A.C.Y.M. COMPARADAS ENTRE SI Y RESPECTO DE SU CEMENTO PORTLAND MATRIZ ACOMPAÑANTE RESPECTIVO PóPY(SOLO EN (15,0%) DE MENOR A MAYOR VALOR. [H-1]		
EDAD (días)	CEMENTOS DE MEZCLA PUZ(P)/PUZOLANA X 60/40 EN PROBETAS DE MORTERO SELENTOSO (21,0% $SO_3$ ) 1:2,75 DE (15,0%)	CEMENTOS DE MEZCLA PUZ(P)/PUZOLANA X 80/20 EN PROBETAS DE MORTERO SELENTOSO (21,0% $SO_3$ ) 1:2,75 DE (15,0%)
7	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
14	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
28	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
365	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
730	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
EDAD (días)	CEMENTOS DE MEZCLA PA(PY-4)/PUZOLANA X 80/20 EN PROBETAS DE MORTERO SELENTOSO (21,0% $SO_3$ ) 1:2,75 DE (15,0%)	CEMENTOS DE MEZCLA PA(PY-6)/PUZOLANA X 80/20 EN PROBETAS DE MORTERO SELENTOSO (21,0% $SO_3$ ) 1:2,75 DE (15,0%)
7	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
14	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
28	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
365	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
730	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)	(M) < (N) < (O) < (A) < (C) < (M)
CLASIFICACION DE LAS DISTINTAS PUZOLANAS EMPLEADAS EN (PARAMETROS QUIMICOS)		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	D < N < O < A < C < M	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,91 < 6,42 < 13,84 < 19,36 < 20,20 < 23,11	
SiO <sub>2</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,80 < 1,46 < 1,00 < 1,61 < 6,44 < 9,42	
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	46,07 > 10,10 > 3,26 > 2,14 > 2,70 > 3,18	
PRATON CON P-1	D > C > A > M > N > O	

IX.- CONCLUSIONES GENERALES

#### IX.- CONCLUSIONES GENERALES

Del estudio expuesto de los Cementos Portland con Adiciones Puzolánicas únicamente, hasta un 40%, en peso, de estas últimas, se deducen las siguientes conclusiones generales:

- 1ª.- Los Cementos Portland con adición de materias puzolánicas únicamente hasta un 40% en peso, se comportan de modo errático, y en fundamento contrapuesto, en sus resistencias ante el ataque de los iones sulfato (RS) y mecánicas a edades iniciales, RM, especialmente. La interpretación que cabe dar a estos resultados se fundamenta principalmente en los efectos que ejercen en el fraguado y endurecimiento, el estado de las alúminas aportadas por la Puzolana y por el Cemento Portland (en éste formando parte del  $C_3A$  principalmente), y a la mayor o menor reactividad de la sílice puzolánica.
- 2ª.- Tomando como base la conclusión general anterior, se puede perfeccionar las RM, a edades iniciales especialmente, o la RS, de un Cemento Portland, por la(s) Adición(es) Puzolánica(s), si la(s) misma(s) son compatibles, por su composición y estructura, con la composición del Cemento Portland de partida, para la consecución de cada objetivo anterior.
- 3ª.- Las expansiones producidas por la formación de ettringita de origen Puzolana(s) (de su  $Al_2O_3^{F-}$ ) y de origen Cemento Portland (de su  $C_3A$ ) al formarse conjuntamente, son más que aditivas, SINERGICAS.

Se han establecido métodos tecnológicos apropiados y rápidos que permiten determinar de una forma sencilla y económica la ACCION SINERGICA EXPANSIVA máxima ó adecuada, según sea el caso, y conocer las dosificaciones más convenientes -en cantidad y calidad de los componentes, Cemento Portland, (ó Clínter Portland en su caso), Puzolana(s) y Yeso- para obtener Cementos de Mezcla, Portland más Puzolana(s) únicamente, de características prefijadas.

X .- DEDUCCIONES DE INTERES

#### X .- DEDUCCIONES DE INTERES

De los resultados experimentales obtenidos de este trabajo, conviene destacar las siguientes deducciones:

1<sup>a</sup>.- La causa de la gran variabilidad de comportamiento existente entre los Cementos de mezcla de este trabajo constituidos por Portland y Puzolana exclusivamente y con un contenido de esta(s) última(s) del 20%, 30% ó 40% en peso, tanto en RS como en RM, se debe:

- 1<sup>a</sup>.1.- En el caso de ELEVADA Resistencia Sulfática, RS, e incremento lento y progresivo de Resistencias Mecánicas, RM,
- bien, a la ausencia en el (los) mismo(s) de  $C_3A$ , fundamentalmente, entre otros, por que su Cemento Portland matriz constitutivo no lo posea, caso de un PY, siempre y cuando la Puzolana acompañante ha sido la ADECUADA,
  - bien, a la práctica ausencia en el (los) mismo(s) de alúmina reactiva,  $Al_2O_3^r$ , en favor de sílice reactiva,  $SiO_2^r$ , aportadas ambas por su fracción Puzolana constitutiva respectiva,
  - bien, al efecto diluyente o dispersante del contenido de  $C_3A$  del Cemento Portland sólo por parte de las Puzolanas que lo acompañan
  - bien, a los tres anteriores en mayor o menor grado.

- 1<sup>a</sup>.2.- En el caso de NO ELEVADA Resistencia Sulfática, RS, y a la vez ELEVADAS Y RAPIDAS Resistencias Mecánicas, RM,
- bien, al  $C_3A$  aportado por su fracción Cemento Portland matriz constitutivo
  - bien, a la  $Al_2O_3^r$  aportada por su fracción Puzolana constitutiva (y quizás también y en su caso al ión  $Al^{3+}$  en forma cristalina) ó
  - bien, a ambas anteriores en mayor o menor grado.

2<sup>a</sup>.- Mediante los resultados experimentales obtenidos, se ha confirmado que los Cementos Portland de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, NO SON LA UNICA Y MEJOR RESPUESTA ANTE EL MENCIONADO ATAQUE (35), ya que existen Cementos de mezcla constituidos únicamente por Portland, P ó PY, y Puzolana(s) ADECUADA(S), que los superan, o sea, que pueden ser de un grado de RS superior, (y viceversa).

Y otro tanto se puede decir, con alguna menor aproximación, para el caso de la consecución de valores notables o elevados de RM a edades iniciales -y superiores por lo común a los de su cemento portland constitutivo solo-, sin mas que emplear en este otro caso la(s) Puzolana(s) ADECUADA(S) para este otro fin.

Tales calificativos de ADECUADAS para cada fin citado, respectivamente, han resultado ser ANTAGONICOS en el presente trabajo. De modo y manera que de todas las puzolanas seleccionadas para la realización del mismo, aquellas, la D y N especialmente—que han podido ser calificadas con exclusividad de ADECUADAS para aumentar en mayor o menor cuantía el grado de RS del Cemento Portland con el que se mezclaron—, no han podido ser calificadas con exclusividad de ADECUADAS para alcanzar valores de RM elevados a edades iniciales (en probetas de mortero selenitoso ASTM C 452 de 1x1x6 cm), y viceversa con la M; habiendo quedado el resto de las puzolanas comparadas en posiciones intermedias entre la D y N por un lado y la M por otro, pero certificando en todos los casos la antagonicidad anterior y con relativa mayor o menor proximidad a esta última y alejadas de aquellas D y N.

Por lo tanto y según todo ello queda confirmada la posibilidad real de aumento de la versatilidad de producción de distintos tipos, clases y categorías de cementos de mezcla, y en particular los de elevada RS y/o RM a edades iniciales, respectivamente, véase la Aplicación XII, 10<sup>a</sup>.

3<sup>a</sup>.— TODOS los Cementos Portland seleccionados para la realización de este trabajo han fijado iones sulfato para formar ettringita, de origen su  $C_3A$  constitutivo, ó ett-lf, la cual originó comunmente unos valores de  $\Delta\phi$  o  $\Delta L$  en las tortas y probetas correspondientes que resultaron ser proporcionales a tales contenidos de  $C_3A$  respectivos.

Del mismo modo TODAS las Puzolanas seleccionadas para la realización de este trabajo han fijado iones sulfato para formar ettringita, de origen su  $Al_2O_3^{r-}$  constitutiva, ó ett-rf, la cual originó unos valores de  $\Delta\phi$  ó  $\Delta L$  en las tortas y probetas correspondientes mayores o menores, según los casos, pero no pudiéndose decir sin mas por ello que TODOS sus cementos de mezcla PA 80/20 y PUZ 70/30 y 60/40 preparados con cada una de ellas para este trabajo, hayan tenido "un mal comportamiento ante el ataque de tales iones sulfato", y por tanto hayan tenido que provocar siempre consecuencias nocivas para sus pastas y morteros respectivos.

4<sup>a</sup>.— La Vf de la ett-rf, o de origen  $Al_2O_3^{r-}$  de la(s) Puzolana(s), ha de ser netamente superior a la Vf de la ett-lf, o de origen  $C_3A$ , del cemento portland. No obstante la presencia de la primera, la ett-rf, acelera notablemente la formación de la segunda, la ett-lf, cuando ambas se forman conjuntamente,

- en un medio portlandítico y selenitoso apropiado, y sobre todo

- a edades iniciales, que no intermedias y finales, del ensayo.

siendo además el fenómeno expansivo resultante de las mismas, a tales edades iniciales, bastante superior en cantidad y rapidez de consecución, a cuando ambas se forman por separado, y por lo tanto de tal magnitud, que de hecho puede considerarse mas que el resultado de la suma simple de los

efectos expansivos respectivos, el resultado de la potenciación de los mismos, ACCION SINERGICA, de cuyas consecuencias positivas o negativas se hablará en las Deducciones 6\*, 6\* y 37\*, y en la Aplicación XII, 10\*, todas ellas venideras.

5\*.- La ACCION SINERGICA citada en la CG. IX.3\* y deducción anterior-confirmable mediante casi todos los parámetros de los distintos métodos acelerados de ensayo empleados en este trabajo-, tiene una manifestación externa distinta según sea torta o probetas, donde se origine -y aún dentro de cada una, según el parámetro medido en la misma que se considere-, de tal modo que tanto en el caso de las tortas L-A, como en el de las probetas de mortero ASTM C 452 e H-1, se excluye la posibilidad de anulación de  $C_3A$  para que aquélla se produzca. Por lo que, entre ambos casos extremos posibles  $C_3A = 0\%$  y  $Al_2O_3^r = n_2\%$  y  $C_3A = n_2\%$  y  $Al_2O_3^r = 0\%$ , existe toda la gama de variabilidad probable de Puzolana W mas Cemento P ó PY, o mejor, Cemento P ó PY + Puzolana W (P ó PY/Puzolana W según la representación expresa realizada al efecto a lo largo de este trabajo), en la que se encuentran,

la ADECUADA a cada puzolana para que la misma origine la máxima ACCION SINERGICA de nocividad dispar, según el parámetro que se considere.

De aquí que al no poderse conocer con EXACTITUD el contenido de  $Al_2O_3^r$  de una Puzolana dada- no siendo ello, quizás, necesario puesto que su comportamiento final va a depender muy mucho del cemento portland P ó PY que la acompañe formando el cemento de mezcla (véase la deducción 10\*, 2)-, para preveer su

- "carácter", o sea, "su comportamiento más probable", bastará simplemente, con emplear un cemento portland de contenido escaso o prácticamente nulo de  $C_3A$  para tal fin, mientras que para determinar su mejor comportamiento

- en RS, bastará que aquel(los) satisfagan las especificaciones correspondientes a moderada o elevada RS, según se trate, de los métodos acelerados de ensayo empleados para determinársela(s), (véase Cap. XII. Aplicaciones), y
- en RM, bastará que la fracción portland constitutiva de aquel(los) sea la ADECUADA en contenido de  $C_3A$  y superficie específica para que con la cantidad óptima correspondiente de yeso origine la máxima ACCION SINERGICA, (véase Cap. XII Aplicaciones),

(En los trabajos realizados objeto de la presente memoria tal grado de adecuación máximo ó ACCION SINERGICA máxima -  $\delta L_{máx}$  y  $RM_{máx}$  a edades iniciales-, se ha alcanzado en distinta cuantía, en todas las familias de cementos de mezcla PA y PUZ preparadas con la puzolana M y especialmente la P-2/M- con superficie específica del P-2 de  $3012 \text{ cm}^2/\text{g}$ -, en forma de probetas de mortero ASTM C 452, de  $1" \times 1" \times 1\frac{1}{4}"$ , y de  $1 \times 1 \times 6 \text{ cm}$ , RMF y RMC, o sea, con un

contenido de iones  $\text{SO}_4^{=}$ , en forma de yeso, y expresados como  $\text{SO}_3$  del 7,0%).

6\*.- Para alcanzar la máxima ACCION SINERGICA derivada de una Puzolana dada (molida a una finura tal que deje un residuo máximo del 20%  $\pm$  1% en tamiz de 45µmm) es necesario que las cantidades de  $\text{C}_3\text{A}$  de la fracción portland y yeso que la acompañen sean las ADECUADAS, respectivamente, para dicho fin, haciéndose saber que sin pasar del 15% de yeso añadido ( $\approx$  7,0%  $\text{SO}_3$ ), el grado de adecuación parece depender bastante mas, - de la cantidad APROPIADA de  $\text{C}_3\text{A}$  aportada por la fracción portland, (la cual para poder ser mínima, pero no nula, según la deducción anterior, hará que la superficie específica del cemento portland tenga que ser menor cuanto mayor sea su contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , y viceversa, véase la Deducción X. 5ª), así como también que tanto el Standard de Cal como la Cal<sub>comb.</sub> el  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$  de dicha fracción portland sean los mas APROPIADOS, o sea, más bien bajos excepto el último ó  $\text{C}_2\text{S}$  que deberá ser todo lo contrario, es decir, alto.

- de la Puzolana y/o el yeso (el cual en este trabajo ha tenido la granulometría del empleado en el método ASTM C 452).

Por otra parte dicha ACCION SINERGICA máxima en cada caso, será de utilidad máxima o nula, en el supuesto de que las características exigidas al Cemento de mezcla Portland mas Puzolana(s) únicamente, de que se trate sea

- RM elevada a edades iniciales, o
- RS elevada.

Finalmente se ha de convenir que,

- en el supuesto probable de que tal grado de finura de molido no se alcance, se deberá moler previa y adecuadamente la Puzolana en cuestión hasta que lo cumpla, so pena de no desear obtener de la misma su máximo aprovechamiento (máxima ACCION SINERGICA), y
- en el supuesto mas probable y común de que tal grado de finura de molido se cumpla holgadamente por exceso, se podrá(n) realizar el (los) ensayo(s) correspondiente(s), indicando expresamente el dato en cuestión, pues los resultados que se obtengan podrán discrepar en alguna medida con el (los) que se obtendría(n) con ese grado de finura de molido expreso.

7\*.- El comportamiento de las puzolanas, D, N, O, A, C, M, CV-10 y CV-19, seleccionadas y comparadas en forma de cementos de mezcla constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s), a través del,

- ensayo de Frattini (parámetro  $[\text{CaO}]$  de la fase líquida),
  - POP (intensidad de pico de la ettringita),
  - ensayo de L-A, (parámetro,  $\Delta\phi$  y PAV),
  - ensayo ASTM C 452 (parámetros,  $\Delta\bar{L}$ , RMF y RMC principalmente) y
  - ensayo HIBRIDO-1 (parámetros,  $\Delta\bar{L}$ , RMF, RMC y Porosidad, principalmente)
- tal y como preconizan sus técnicas operatorias respectivas, es un fiel reflejo de la cantidad de ettringita que forman y consiguientemente de



- 600 -

su contenido mas probable de  $Al_2O_3^{r-}$  de cada una, respecto de las demás (el cual está relacionado algo circunstancialmente con su contenido de  $Al_2O_3$  (%) respectivo).

Tal relación directa y clasificación correspondiente de las puzolanas citadas se ha manifestado por lo general bastante mas claramente, -sobre todo en los cuatro últimos ensayos-, cuando el cemento portland acompañante común de las mismas ha tenido un contenido de escaso a nulo de  $C_3A$  -VIA DEDUCTIVA DIRECTA- (esto es el fundamento de las Aplicaciones XII, 2ª.2º, 4ª.2º, 5ª, 7ª.2º y 8ª (venideras)), y viceversa, en cuyo caso, cemento portland de contenido mediano a elevado de  $C_3A$ , ha ocurrido por lo general todo lo contrario, -VIA DEDUCTIVA INDIRECTA, en su caso. Siendo desaconsejable por tanto realizar en tal caso clasificación alguna de ellas, pues los errores que se cometerían podrían ser bastante considerables. No obstante y en tal supuesto equívoco, tan sólo los resultados obtenidos a las edades iniciales del ensayo, y a mas iniciales mejor (aunque en cualquier caso antes de la edad de 28 días) y a igualdad de cemento de mezcla 60/40 tan sólo, cuantomayor sea el contenido de  $C_3A$  de su cemento portland matriz constitutivo, y viceversa -en cuyo caso mas extremo posible, de nulo contenido de  $C_3A$ , podrá ser además a igualdad de cemento de mezcla 70/30, y quizás 80/20 si la puzolana es mas aluminica que silicea-, podrían resultar válidos, en cierta medida, para clasificarlas.

8ª.- Por lo tanto según la deducción anterior y los resultados experimentales obtenidos, la clasificación que se obtiene de las ocho puzolanas aquí ensayadas en forma de cementos de mezcla preparados con cada una de las mismas y un cemento portland de escaso a nulo contenido de  $C_3A$ , PY, únicamente a través de los ensayos de,

- la Parte Operatoria Previa, POP,
- Le Chatelier-Anstett, ( $\Delta\phi_{28d}$  y PAV),
- ASTM C 452, ( $\bar{\Delta}L_{28d}$  y  $RM_{7-28d}$ ),
- HIBRIDO-1, ( $\bar{\Delta}L_{28d}$  y  $RM_{7-28d}$ )

principalmente, y a igualdad de todo lo demás, han resultado ser TOTALMENTE COINCIDENTES

a) con las obtenidas mediante su contenido de  $Al_2O_3$  (%) y/o módulos

A/F respectivos, según convenga, véase Tabla 11, y

b) con la que se debería obtener en función de su contenido relativo probable de  $Al_2O_3^{r-}$  de cada una de ellas respecto de las demás, la cual deberá ser como sigue

$< Al_2O_3^{r-} <$ (%)	D < N < O <      < A < C <      < M
	< CV-19 <      < CV-10 <

No obstante ello no implica necesariamente,

- que ambos contenidos, de  $Al_2O_3(\%)$  y  $Al_2O_3^{f-}(\%)$  de cada una de ellas, tengan que ser obligatoria y forzosamente iguales, y menos aún quizás en las puzolanas artificiales, tipo cenizas volantes y similares, que en las naturales, y
- que éste,  $Al_2O_3^{f-}(\%)$  tenga que ser siempre función directa de aquél,  $Al_2O_3(\%)$ ,

Por lo tanto y en definitiva tal clasificación obtenida de las puzolanas citadas y las posiciones extremas ocupadas en la misma por la referencial silícica D y referencial aluminica M, no viene sino a confirmar la antagonicidad de comportamiento de ambas -denunciado directa ó indirectamente a lo largo del presente trabajo-, en un medio sulfático mas o menos agresivo, de modo y manera que mientras el de la primera, la D, se podría definir como "anti-sulfato", el de la segunda, la M, se podría definir como "pro-sulfato", con las consecuencias tecnológicas respectivas pertenientes como son

- comportamiento "PROTECTOR" ó "beneficioso" ante el ataque de los iones sulfato, caso de la D, N y similares, y
- comportamiento "NO PROTECTOR" o mejor "anti-protector" ó "perjudicial" ó "nocivo", ante el ataque de los iones sulfato, caso de la M y similares,

respectivamente, (¡ Y todo ello, pese a haber recibido ambas un periodo adecuado de curado de 14 días, cuando se ensayaron a través del método acelerado de ensayo de L-A, antes de su puesta en contacto con el medio sulfático agresivo !)

9\*.- Se ha confirmado el primer fundamento de este trabajo puesto que desde el punto de vista de la resistencia al ataque de los iones sulfato TODA PUZOLANA EMPLEADA EN CUALQUIER CEMENTO DE MEZCLA CONSTITUIDO ÚNICAMENTE POR PORTLAND Y PUZOLANA, TIENE POR LO GENERAL, UNA DUALIDAD DE COMPORTAMIENTO EN PARALELO,

- UNO, COMO SI FUERA UN INERTE  $RS$ , MAS O MENOS PARCIAL O APARENTE, Y
- OTRO, COMO TAL PUZOLANA,

los cuales pueden aumentar individualizadamente, en uno u otro sentido, en detrimento del otro, de modo y manera que en el caso extremo de comportarse como un INERTE  $RS$  INTEGRAL, dejaría de ser puzolana -desde el punto de vista tradicional de RM, pero no quizás de RS-, y viceversa.

Por lo tanto y según ello la diferencia entre lo teórico (como un INERTE  $RS$  INTEGRAL) y lo real (como tal Puzolana) podrá ser, nula o máxima de uno u otro signo, según el carácter eminentemente de INERTE  $RS$  integral, o SILICICO ó ALUMINICO, respectivamente, de la misma.

Tal calificativo de  $INERTE_{RS}$  no es cuali ni cuantitativamente equivalente al calificativo  $INERTE_{RM}$ , habiendo sido ambos en la mayoría de los casos, totalmente antagónicos.

Por otra parte dichas diferencias, de uno u otro signo, en RS y RM, -aumento ó disminución de RS, unido a disminución ó aumento en RM, respectivamente- y por tanto de interés tecnológico diverso y dispar, a un tiempo, se ven derivadas de :

- a) la composición físico-química y fundamentalmente química y sobre todo reactiva de sus factores hidráulicos correspondientes,  $SiO_2^{R-}$ ,  $Al_2O_3^{R-}$  y  $Fe_2O_3^{R-}$ ,
- b) del contenido absoluto de  $C_3A$  del cemento portland P ó PY que acompañe a cada puzolana, y
- c) de la cantidad de cada uno de los anteriores presentes en cada caso, pero manifestándose ambas tanto mas pronto, a la edad de 7, 14 días (y a mas inicial mejor), cuanto mas aluminica que silícea, ha sido la Puzolana en cuestión, y viceversa, en cuyo caso, las edades premonitórias correspondientes deberán ser las siguientes a las anteriores, y a mas avanzadas mejor, 21, 28, 60 ó 90 días.

10<sup>a</sup>.- Según los resultados experimentales obtenidos de todas y cada una de las puzolanas seleccionadas para la realización de este trabajo, bien solas o mezcladas con algún cemento portland matriz acompañante común, P ó PY, en forma de cementos de mezcla PA y/o PUZ, analizadas y ensayadas mediante Análisis Químico (AQ), Ensayo de Fratini, Parte Operatoria Previa (POP), ensayo de Le Chatelier-Anstett (L-A), ensayo ASTM C 452 y ensayo HIBRIDO-1, respectivamente, se puede decir que ha habido una,

- GRAN COINCIDENCIA, para el caso de las Puzolanas Referenciales Silícea D (y también la no referencial silícea N) y la Aluminica M, las cuales la han llegado a tener incluso entre los abstractos ensayos del AQ y de Fratini, o mejor, entre sus contenidos absolutos de  $Al_2O_3$ (%) y/o relativos MF derivados del primero y su grado de actividad puzolánica derivado del segundo, y
- MEDIANA O PARCIAL COINCIDENCIA, para el resto de las puzolanas ensayadas O, A, C, CV-10 y CV-19, dado que la gran coincidencia sólo se ha alcanzado entre las mismas en los ensayos, POP, L-A, ASTM C 452 e HIBRIDO-1, pero no en cambio en el ensayo de Fratini y Análisis Químico, aunque bastante mas coincidentes con este último, que con aquél.

Por lo que de todo ello se deduce:

10<sup>a</sup>.1.- Que los contenidos TOTALES de  $SiO_2$ (%),  $Al_2O_3$ (%) y  $Fe_2O_3$ (%) de una puzolana dada -a diferencia de lo que ocurre con los correspondientes a un cemento P ó PY-, son de MUY ESCASO VALOR PREDIC-

TIVO SOBRE EL COMPORTAMIENTO MAS PROBABLE de la misma en un medio sulfático agresivo, siendo tan sólo,

- la práctica nulidad informativa que los mismos proporcionaban al respecto hasta el momento, y
- los resultados y conclusiones obtenidos, entre otros, de este trabajo,

los que han hecho que el mensaje citado derivados de aquellos,  $\text{SiO}_2(\%)$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3(\%)$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\%)$ , NO CONTINUE SIENDO TOTAL Y ABSOLUTAMENTE NULO, COMO HASTA AHORA, elevándose por ello solamente al rango de MUY SIMPLE Y ESCASO INDICIO de aquél, y por tanto situado aún a muchísima distancia del correspondiente derivado para un cemento portland, P ó PY.

No obstante, tan sólo de aquellos materiales

- cuya suma  $\text{SiO}_2(\%) + \text{Al}_2\text{O}_3(\%) + \text{Fe}_2\text{O}_3(\%) \geq 70,0\%$ , y
- cuyo contenido de  $\text{SiO}_2(\%) \geq 60,0\%$ , y
- cuyo cociente  $\text{SiO}_2(\%)/\text{Al}_2\text{O}_3(\%)$ ,
  - . supere el valor de 6 (caso de puzolanas "silícicas"), ó
  - . no supere el valor de 3,18 (= 73,53%  $\text{SiO}_2$  de X/23,11% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de X) (caso de puzolanas "aluminicas")

se podría tener sin más, un esperanzador indicio de su quizás probable comportamiento, tanto en el medio agresivo anterior como en la ausencia del mismo (la práctica mas común), (e igualmente de los materiales "ferricos" correspondientes cuyo valor límite respectivo no ha sido objetivo de este trabajo por las razones aducidas en el capítulo VI), el cual se podría llegar a convertir incluso en alentador, siempre y cuando, tales tipos de materiales citados satisfagan, al menos, debidamente a la edad de 28 días, el ensayo de Fratini, (por lo común, en el caso de algunas puzolanas silícicas, difícilmente a la edad de 7 días, solíendolo cumplir a la de 28 días, y en el caso de bastantes puzolanas aluminicas sobradamente y con holgura a la edad de 7 días), ó cualquier otro normalizado en forma de probeta de mortero.

De aquí que, al estar comprendidos, como se ha dicho entre otros, en el consejo práctico general XI, 5º, la mayor parte de los materiales mas o menos puzolánicos entre tales casos extremos tan específicos anteriores, "silícicos", "aluminicos" y "ferricos", tales indicios citados difícilmente podrán llegar a ser esperanzadores, en estos otros casos posibles intermedios

(probabilísticamente los mas numerosos en la realidad) por lo que se quedarían simplemente en INDICIOS, A SECAS, ocurriendo otro tanto con el correspondiente ensayo de Fratini aunque el mismo lo satisfaga debidamente.

10\*.2.- Que los contenidos parciales de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en especial de la segunda, -en el supuesto de poderse conocer con exactitud mediante un método analítico apropiado-, pese a ser un INDICIO BASTANTE MAS ESPERANZADOR, que el de los totales respectivos anteriores, y poder ser quizás mas rápidamente refrendable mediante el ensayo de Fratini, TAMPOCO PODRIAN PROPORCIONAR EL EXACTO Y ESPERADO COMPORTAMIENTO DE CUALQUIER PUZOLANA EN CUALQUIER MEDIO, AGRESIVO O NO -sólo de forma bastante aproximada, de una puzolana "silícica" y/o una puzolana "alumínica"- CON CUALQUIER CEMENTO PORTLAND, P o PY, en forma de cemento de mezcla (constituídos únicamente por ambos) -sólo de forma bastante precisa esas dos anteriores citadas "silícica" y "alumínica", con un cemento portland de escaso a nulo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , PY ó tipo V USA o similares-, puesto que el mismo DEPENDE A LA PAR DE AMBAS FRACCIONES, Puzolana Y y Cemento Portland X, CONSTITUTORAS en exclusiva, del cemento de mezcla PA o PUZ de que se trate.

Por lo que por todo ello, queda justificada una vez más, lo dicho a propósito en el Comentario VII.4.3. de la PCP y es la urgente necesidad de la puesta a punto de un método acelerado de ensayo ADECUADO, para cada fin, es decir, para poder refrendar de este modo el conocido adagio de "POR SUS HECHOS ... - COMPORTAMIENTO - ... LA(S) CONOCEREIS ..." y llenar de este modo de esperanza la gran incertidumbre sobre el comportamiento más probable de aquella(s), en todos los órdenes, que existe en la actualidad. Dicho método acelerado de ensayo bien pudiera ser alguno(s) de los tres empleados en la realización de este trabajo, Le Chatelier-Anstett, ASTM C 452 e HIBRIDO-1, aplicado tal y como se especifica en el apartado correspondiente del Cap. XII Aplicaciones.

11\*.- La actividad puzolánica de una Puzolana dada (disminución mayor ó menor pero a un mismo tiempo de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$  de la fase líquida), según el ensayo de Fratini, en forma de cementos de mezcla PA o PUZ constituídos únicamente por Portland y Puzolana, guarda una relación cierta con,

- su grado de susceptibilidad mayor o menor al ataque de los iones sulfato y por tanto con la cantidad de etf-rf o mejor su efecto expansivo ( $\Delta\theta$  e  $\Delta L$ ),

- su comportamiento negativo o positivo en un cemento de mezcla PA y/o PUZ constituido únicamente por la misma y fracción Portland, frente al mencionado ataque agresivo, y
- su comportamiento en la consecución de muy notables y rápidos valores de RM iniciales de 7, 14, 21 y 28 días, a flexotracción y compresión por el (los) mismo(s), los cuales se estabilizan con prontitud y viceversa en caso contrario, respectivamente,

Dicha relación, es tanto más directa y estrecha, cuanto más "aluminica" ó "silícica" es la puzolana, y viceversa, como así ha ocurrido en todos los ensayos aquí realizados con las puzolanas, C, CV-10 y N por parte de las primeras y las puzolanas D y M por parte de las segundas, respectivamente.

Finalmente en el supuesto posible de que tal fijación mayor o menor, pero a un mismo tiempo, de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$  de la fase líquida del ensayo de Fratini, no sea proporcional entre sí, sino todo lo contrario, es decir mayor o bastante mayor fijación de  $\text{Ca}^{2+}$  que de  $\text{OH}^-$  -el cual difiere que paradójicamente "aumenta en lugar de disminuir a la par del  $\text{Ca}^{2+}$  como debiera"- puede decirse con fundamento que en dicha fase líquida hay mucha cantidad de alcalinos  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$ ,

- . ó bien procedentes del clinker portland (hecho éste menos probable),
- . ó bien procedentes de la(s) Puzolana(s) que le acompañe(n) (hecho éste más probable),
- . ó bien procedentes de ámbos en mayor o menor grado aunque quizás más de la(s) Puzolana(s) (hecho éste más probable),

habiéndose originado una capacidad de intercambios iónicos ó "capacidad de cambio" a secas, entre el  $\text{Ca}^{2+}$  fijado (descenso de la  $[\text{Ca}^{2+}]$ ) y los  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$  liberados en su caso por aquélla(s) la(s) Puzolana(s) acompañante(s)), que son en definitiva los que han hecho aumentar (como debiera) la alcalinidad de la fase líquida.

En este supuesto posible en ocasiones, las RM no serán como debieran inversamente proporcionales a la disminución de la  $[\text{Ca}^{2+}]$  en la fase líquida del ensayo de Fratini, sino todo lo contrario, es decir, directamente proporcionales. Por el contrario, sí serán inversamente proporcionales a la  $[\text{OH}^-]$  ó alcalinidad de dicha fase líquida, estribando por tanto en todo ello,

- . las notables discrepancias encontradas en múltiples ocasiones entre ámbos tipos de ensayos normalizados, el de Fratini y el de RM en mortero normalizado 1:3, y en definitiva,
- . el cuestionamiento sufrido por el primero desde su creación.

128.- Según los parámetros  $\Delta\beta$  y  $\Delta L$  el comportamiento puzolánico de las puzolanas D, N y M en los ensayos de,

- RS, han sido el de como tal puzolanas aunque el resultado dispar ya que
  - . el de la D y N han resultado ser positivos e beneficiosos, mientras que,
  - . el de la M ha resultado ser negativo ó perjudicial, y de
- RM, ha sido
  - . el de la D y N se asemejan bastante al de un INERTE  $_{RM}$  (por lo general algo más la D que la N), superándolo por defecto en ocasiones, más
    - . con la Puzolana D que con la M,
    - . en RMC que en RNF,
    - . cuanto más inicial ha sido la edad del ensayo,
    - . cuanto mayor ha sido la adición de puzolana, y
    - . cuanto menor ha sido el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  y grado de finura de molido del cemento portland matriz que la(s) ha acompañado, y

- ... el de la N ha sido el de como tal puzolana.
- 13.- La actuación puzolánica de las puzolanas silíceas D y N en estos medios tan selenitosos a través de sus geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}$  respectivos, se traduce por tanto,
- en facilitar una mayor y más rápida hidratación selenitosa de su fracción de cemento portland matriz acompañante respectivo,
  - en crear RMF y RMC, mas lentamente que lo hiciera su cemento portland matriz acompañante respectivo común sólo, y más aún la D que la N, y
  - en retrasar-impedir, según los casos, la formación de la ettringita que debiera originarse, en su caso, de aquél, en ausencia de las mismas.
- 14.- Tanto el mecanismo de formación de la ettringita de cualquier origen y etiología como el de la formación de los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}$  de las puzolanas, D ó N de cementos de mezcla PA y/o PUZ son más adscribibles al modelo<sup>2</sup> topocéfalo con o sin disolución previa, que al modelo through-solution o a una combinación de ambos, con notable primacía del primero, ya para entonces con disolución previa, sobre el segundo.
- 15.- La presencia de  $\text{SiO}_2^{\text{r}}$  en aquellas mezclas conglomerantes selenitosas, donde las puzolanas D y N estuvieron presentes respectivamente, en menor (20% en peso y el resto fracción cemento portland matriz acompañante P ó PY) ó mayor (100% en peso, y como acompañante  $\text{Ca(OH)}_2$  R.A.) cuantía:
- a) No ha evitado totalmente aunque sí dificultado, retrasado ó impedido, de notable a muy notablemente según los casos, la formación de ettringita de cualquier origen y etiología, la cual por lo general ha sido mas bien escasa (POP) o bien sus consecuencias expansoras correspondientes, menor  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\bar{L}$ , etc., y mas escasas(a) aún con curado adecuado previo (método L-A, véase consejo práctico XI,122) que sin él (métodos ASTM C 452 e H-1), de su cemento de mezcla PA o PUZ preparado con cada una de aquéllas D ó N y cemento portland únicamente, de aquí el apreciable y marcado "carácter" "anti-ataque sulfático" ó "anti-sulfato" de las mismas.
  - b) No ha formado sulfato-silicatos de calcio hidratados,  $\overline{\text{SSCH}}$ , cristalinos, y
  - c) No ha formado tobermorita(s) cristalina(s) I y/o II de Taylor (161), la(s) cual(es) ha(n) debido de existir tan pronto por tanto en todas las distintas pastas y morteros de este trabajo al estado de gel y lógicamente no detectables por DRX.
- 16.- La dificultad apuntada en la deducción anterior no es ABSOLUTA sino RELATIVA, es decir, que a una determinada cantidad de ettringita TOTAL a formar en cada caso, le debe corresponder, en "calidad", C/S, y "cantidad", ADECUADAS, -al parecer de cociente C/S tanto más 0,9 cuanto mayor sea aquélla, un determinado gel tobermorfítico de origen  $\text{SiO}_2^{\text{r}}$  de la puzolana D ó N ó similar, para impedir-dificultar notablemente la formación de aquélla y sus efectos perniciosos correspondientes.
- Tales características "calidad" y "cantidad" de gel tobermorfítico en cuestión se han alcanzado mejor en los cementos de mezcla 60/40 que en los 80/20 hermanos de todas las familias, aumentándose no obstante y proporcionalmente el comportamiento "anti-sulfato" de ambos, mediante el periodo de curado máximo adecuado -14 días en el mejor de los casos, en este trabajo-, de los mismos -mejor difase de su puzolana D ó N constitutiva- que sin él.

De aquí que aquellos hayan resultado ser bastante mejores, y por tanto mas ADECUADOS, en calidad y cantidad y a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ, en el método L-A que en el ASTM C 452 ó que en el HIBRIDO-1

- 17.- Tanto el ensayo de Fratini como el de ASTM C 452 e HIBRIDO-1, confirman que la actividad puzolánica de la puzolana N, ha sido por lo general, apreciablemente superior a la de la D, por lo que las reacciones puzolánicas derivadas de aquélla se han completado antes que las de ésta. Y todo ello debido al mayor contenido de  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  y/o  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , según el método de ensayo que se considere, de la primera sobre la segunda; traducible en su sentido práctico, en que los geles  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de la puzolana N deben de tener una relación C/S menor que los de la D, no habiéndose podido precisar el tipo y grado de participación de la  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  anteriores en cada uno de los términos de dicha relación, ni la cantidad de dichos  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  en cada caso.
- 18.- Según el ensayo ASTM C 452, pese a tener que ser el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de la puzolana N bastante escaso respecto a las demás puzolanas, C, A, C, M, CV-10 y CV-19, ha sido el suficiente como para poder confirmar mas claramente sus consecuencias, ett-rf e  $\bar{\Delta}\text{L}$  correspondiente, entre otros, conforme menor ha sido el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento portland matriz que acompañó a la misma, caso del PY-4 y PY-6 principalmente, merced al ligero aumento del grado de RS de los mismos solos, y viceversa, en cuyo caso quedó enmascarado por los efectos correspondientes derivados de la ett-lf acompañante respectiva, y por tanto el aumento del grado de RS correspondiente fué muy notable, y tanto mas notable cuanto mayor fué su contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , caso del P-1, P-2, P-31, P-5 y PY-1, por este orden, de menor a mayor contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ .
- 19.- Por lo general en todas las probetas de 1x1x6 cm de portero selenitoso ASTM C 452 de cada una de las puzolanas silícicas D y N aquí empleadas, los valores de la RMF y RMC de las mismas han resultado ser,
- a edades iniciales del ensayo, (de 1 a 28 días aproximadamente), y a mas inicial mejor, notablemente mayores, con el agua de amasado  $c = \text{cnte.} = 0,485$ , que con el agua de amasado  $d \neq \text{cnte.}$ , o sea,  $0,6 \leq d \leq 1,0$ , en cuyo caso han alcanzado en ocasiones valores apreciablemente bajos, y
  - a las edades finales del ensayo (de 270 a 730 días), y a mas final mejor, OCURRE TODO LO CONTRARIO, es decir, el descenso (suave), y ascenso (notable), respectivo de las mismas, que en el caso de la d han llegado a ser en ocasiones y proporcionalmente muy notable.



- 20\*.- Las clasificaciones de las puzolanas CV-10 y CV-19 en función de cada uno de los distintos parámetros de los diferentes ensayos han sido prácticamente coincidentes, siendo de destacar de entre todas ellas, por su posible trascendencia, las obtenidas mediante,
- el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (%)
  - el MF,
  - el ensayo de Fratini,  $[\text{CaO}]$  de la fase líquida,
  - el método de L-A,  $\Delta\bar{L}_{28d}$ ,
  - el método ASTM C 452,  $\Delta\bar{L}_{28d}$ , y
  - el método H-1,  $\Delta\bar{L}_{28d}$ ,
- de cada una de ellas.

No obstante se ha de reconocer que las obtenidas a dicha edad de 28 días a través de los métodos acelerados de ensayo L-A y ASTM C 452, lo han sido por vía deductiva mas que directa, que sería lo deseable como así ha ocurrido con el método H-1, siendo ello debido,

- al efecto sinérgico y endurecedor tan acusado del primero, L-A, y
- a la falta de  $\text{SO}_3$ , del segundo, ASTM C 452.

Y asimismo que las derivadas de los parámetros Porosidad y Vu tienen diferencias apreciables adscribibles presumiblemente a la falta de sensibilidad necesaria de sus técnicas operatorias respectivas (véase la Deducción XI.40\*).

- 21\*.- En contra de la opinión generalizada existente y referente a que las ventajas en RM derivadas del empleo de las Puzolanas con Cemento Portland (ó Clinker) en exclusiva, se suelen manifestar por lo común a edades mas bien tardías que tempranas en las probetas de mortero u hormigón de los que tales Cementos de Mezcla entran a formar parte, se ha de decir que ello es tanto mas cierto cuanto,
- más eminentemente silícica que aluminica es la puzolana empleada, y viceversa, en cuyo caso -las eminentemente aluminicas y similares- se manifiestan a edades tempranas, 7, 14, 28 días, o muy tempranas incluso, 1 ó 3 días, y cuanto
  - menos adecuadamente curados han sido aquellos.

- 22\*.- El comportamiento de la puzolana C en el ensayo de Fratini se puede considerar, en general, el mejor de todas las puzolanas empleadas y comparadas con ella -mejor incluso que el de la referencial aluminica, M que es la que le sigue en dicho orden en tal ensayo-, pudiéndosele calificar de excelente. Por el contrario y desde el punto de vista de la RS no se puede decir otro tanto, pese a lo cual su comportamiento, sobre todo a través de los tres métodos acelerados de ensayo, L-A, ASTM C 452 e H-1, parece haber sido menos malo de lo que en realidad debería haberle correspondido por su relativa mayor proximidad de todas, junto con la CV-10, a la puzolana M.

Y la causa común de tales comportamientos respectivos de la puzolana C ha sido el notable mayor contenido de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  de la misma sobre los del resto de las puzolanas con ella comparadas y del mismo modo ensayadas.

Por otra parte las puzolanas O y CV-19 también parece que han participado en algo de este hecho en relación a la A y CV-10 respectivamente, por idéntico motivo.

No obstante y pese a todo lo cual, los escasos resultados casuísticos, causísticos y no seriados obtenidos al respecto en este trabajo, no permite(n) extrapolación(es) alguna(s) en ningún sentido, ni obtener, por tanto, conclusiones mas claras sobre la influencia, en el grado de - susceptibilidad al ataque de los iones sulfato de una Puzolana dada y/o su(s) Cemento(s) de mezcla correspondiente(s) constituido(s) por ella y cemento portland únicamente, de su(s) contenido(s) de  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$  constitutivos(s), o sea(s) la(s) posible(s), o no, implicación(es) ulterior(es) en otro(s) tipo(s) de agresividad(es) subsidiaria(s), tal(es) como, ataque(s) por disolución(es) extremadamente básica(s), reacción(es) álcali-árido, etc.

23.- A tenor de los resultados experimentales obtenidos de este trabajo la velocidad de difusión de la disolución selenitosa agresiva en cada torta y/o probeta de cemento de mezcla PA ó PUZ preparado con cada una de las puzolanas seleccionadas aquí ensayadas, ha de ser,

- mínima, en el caso de que hayan sido las puzolanas D ó N, respectivamente, las que las constituyan, y tanto menor cuanto mayor es la cantidad de éstas, D ó N, presente en las mismas, y viceversa, lo cual unido a la ya clásica porosidad elevada que estas puzolanas y similares confierenle a aquellos, hace sospechar que tal impedimento deberá de ser a modo de barrera y/o pantalla protectora, no habiéndose podido concretar exactamente, según lo dicho a propósito en el Fundamento General VI.1.7<sup>a</sup>, en la interpretación VIII.1.2.2.1. (E) (F) (L-A) y VIII.2.2.2.1. y 2 (ASTM C 452)

- máxima en el caso de que haya sido la puzolana M la que las constituya torta y/o probetas, la cual al no conferirle de origen a ambas, la ya clásica elevada porosidad de las anteriores D ó N, confirma que es la propia puzolana M y más concretamente su  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  constitutiva, quien la origina mediante su etf-rtf correspondiente a partir del instante mismo del inicio de la hidratación selenitosa respectiva,

la cual habrá de ser, a partir de dicho instante, profundamente expansiva y engendradora de poros, pues en particular la torta (pasta hidratada) se había compactado para su fabricación con una presión de compactación de  $20 \text{ Kp/cm}^2$  durante 1 minuto, e

- intermedia de las anteriores, en el caso del resto de las puzolanas comparativamente ensayadas con las anteriores D, N y M, es decir, la O, A, C, CV-10 y CV-19.

24\*.—Mediante los métodos acelerados de ensayo L-A, ASTM C 452 e HIBRIDO-1, y a igualdad de todo lo demás, se ha visto,

- que la Vf de la ett-lf ha de ser  $>$  la Vf de los  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de D ó N  $\frac{a}{c} = c >$  la Vf de  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de D ó N  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$
- que la Vf de  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de N,  $\frac{a}{c} = c$  y/o  $\frac{a}{c} = d$ , ha de ser  $>$  la Vf de  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de D.  $\frac{a}{c} = c$  y/o  $\frac{a}{c} = d$ ,
- que la Vf de  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$  de D ó N,  $\frac{a}{c} = c$  y/o  $\frac{a}{c} = d$ , ha de ser  $>$  la Vf de  $\text{CSH}_{\text{C}_3\text{S}}$  y/o  $\text{C}_2\text{S}$ , (confirmable además mediante el parámetro Porosidad),
- que la Vf de la ett-rf de origen el  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de N ha de ser  $>$  la Vf de  $\text{CSH}_{\text{SiO}_2}^{\text{r-}}$ ,  $\frac{a}{c} = c$  ó  $d$  de la N, y
- que la Vf de la ett-lf ha de ser  $>$  la Vf de los  $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$ , y
- que la Vf de la ett-lf ha de ser  $>$  la Vf del  $\text{CO}_3\text{Ca}$  Sint. de origen portlandita.

25\*.—Mediante todos los parámetros empleados en este trabajo y en especial, el  $\Delta\theta$ ,  $\Delta L$ , RMF y RMC (y mejor sus velocidades de crecimiento correspondientes) se confirma en contra de la opinión generalizada existente al respecto que, las reacciones puzolánicas derivadas de la presencia de cualquier Puzolana, (y más concretamente de su  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ ,  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  constitutivas), en un cemento de mezcla PA ó PUZ, transcurren por lo general mayoritaria y sobradamente —tanto más mayoritaria cuanto más silícica, y tanto mas sobrada cuanto más aluminica sea la puzolana y viceversa—, durante los primeros 28 días de edad de las tortas y/o probetas correspondientes (en bastantes ocasiones durante los primeros 7 días), aunque con manifestaciones externas en sistemas tan selenitosos, totalmente diferentes,

- expansiva, la primera,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , y
  - anti-expansiva, la segunda,  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ , y quizás la tercera,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ ,
- pero siempre con mayoría notable sobre las correspondientes al cemento portland, P ó PY, acompañante respectivo solo, pese a que en éste se verifiquen mayoritariamente también. No obstante en aquellos casos donde ello no ocurre, cementos de mezcla (PY-4/M 80/20), (PY-6/M 80/20) y (PY-1/M 80/20) ensayados según el método H-1, la cantidad de hidratación

selenitosa verificada durante los primeros 28 días del ensayo, es la necesaria y suficiente para su calificación y/o cualificación veraz correspondiente y/o, de su puzolana aluminica constitutiva ya que con las mismas será únicamente y en tales casos cuando ello se produzca.

Por todo ello, queda pues más que justificada la posibilidad real de aplicación racional de todos los métodos acelerados de ensayo empleados en este trabajo, L-A, ASTM C 452 e HIBRIDO-1, e ideados en un principio y en exclusiva para los cementos portland (en particular los dos primeros), para poder calificar y cualificar tanto a los cementos de mezcla PA y PUZ preparados con Portland y Puzolana(s) únicamente, como a la(s) Puzolana(s) que lo(s) constituye(n) en su caso, para un fin determinado, sin mas que aplicar las especificaciones correspondientes, véase Cap. XII-Aplicaciones.

26<sup>a</sup>.- La mayor formación del TOTAL de  $\text{ett-lf}$  expansiva de origen  $\text{C}_3\text{A}$  que se deba de formar en cada torta o probeta, se debe originar durante los primeros 28 días de la misma. Tan sólo cuando exista la presencia de puzolana(s) eminentemente silícica(s) aquélla se podrá ver retrasada de apreciable a notablemente e incluso impedida en su totalidad, según la cantidad presente de la(s) misma(s) para este fin y si la fase de curado del (los) cemento(s) de mezcla de la(s) misma(s) ha sido la adecuada para ello, y viceversa en el caso contrario, o sea, en el de la(s) puzolana(s) eminentemente aluminica(s). Y sin que por ello en ambos casos antagónicos extremos dejen de verificarse, en su mayor parte al menos (caso de las silícicas), las reacciones puzolánicas derivadas de aquellas en el mismo periodo de tiempo de 28 días, véase la deducción anterior.

27<sup>a</sup>.- La calificación y cualificación de las puzolanas eminentemente silícicas y similares se verifica tanto mejor, cuanto mayor sea el contenido de  $\text{SO}_3$  agresivo del método acelerado de ensayo empleado, en este caso el L-A e H-1 y con un cemento portland P que con uno PY, de acompañante. Por otra parte otro tanto se podría decir de las eminentemente aluminicas, caso de la M y similares en cuyo caso se aumenta además en rapidez para dar el diagnóstico, pero en este caso con un cemento portland PY mejor que con un P, de acompañante.

28<sup>a</sup>.- La edad para poder calificar de elevada o moderada RS a un cemento portland ensayado mediante el método L-A puede ser sobradamente la de 28 días de su torta correspondiente, prolongándose hasta la edad de 90 días a lo sumo, tan sólo excepcionalmente y en caso de máxima duda, para poderlo calificar de elevada RS con el valor del  $\Delta\theta_{28d}$ .

Y otro tanto se puede decir para los cementos de mezcla constituidos por portland mas puzolana(s), única y exclusivamente.

29ª.- El método acelerado de ensayo HIBRIDO-1 puede tener tal cual o con las modificaciones apropiadas que no afecten a su fundamento, similar campo de utilización tanto para los cementos portland como para los de mezcla binarios Cemento(s) Portland - Puzolana(s) que el L-A y ASTM C 452 con idénticas virtudes y defectos, aunque no obstante y por idénticos motivos, tendrá los mismos detractores del L-A a la vez defensores del ASTM C 452 por razones obvias.

30ª.- Para poder calificar y cualificar a un cemento portland ensayado,

- mediante el método de L-A como,

- . de elevada RS, el valor del  $\Delta\phi_{28d}$  de su torta correspondiente no podrá sobrepasar el valor del 1,25% de su diámetro inicial,  $\phi_0$ ,
- . de moderada RS, el valor del  $\Delta\phi_{28d}$  de su torta correspondiente no podrá sobrepasar el valor del 4,00% de su diámetro inicial,  $\phi_0$ ,

- mediante el método ASTM C 452, como,

- . de elevada RS, el valor del  $\bar{\Delta L}_{14d}$  de sus probetas correspondientes no podrá sobrepasar el valor del 0,040% según la norma ASTM C 150-84a,
- . de moderada RS, el valor del  $\bar{\Delta L}_{28d}$  de sus probetas correspondientes no podrá sobrepasar el valor del 0,073% según la propuesta realizada a la luz de este trabajo, y

- mediante el método HIBRIDO-1, como,

- . de elevada RS, el valor del  $\bar{\Delta L}_{28d}$  de sus probetas correspondientes no podrá sobrepasar el valor del 0,044%,
- . de moderada RS, el valor del  $\bar{\Delta L}_{28d}$  de sus probetas correspondientes no podrá sobrepasar el valor del 0,095%,

ambos, según la propuesta realizada a la luz de este trabajo y adoptable en su momento si procede. Debiendo ser cada uno de los mismos, anteriores, el único y fundamental criterio individualizado exigible en su momento si ha lugar, para poder calificar, o no, de elevada o moderada RS a cada cemento portland que se ensaye mediante el método

de ensayo correspondiente; por lo que cualquier otro criterio como por ejemplo el valor respectivo del  $\Delta\phi_{14d}$  ó  $\bar{\Delta L}_{14d}$ , deberá considerarse sólo como adicional secundario y no supletorio en caso alguno de calificación de cemento alguno, excepto en el caso del Cemento Portland y mediante método ASTM C 452-75, que tal valor  $\bar{\Delta L}_{14d}$  habrá de ser el exclusivo.

Tales especificaciones,  $\Delta\phi_{28d}$  e  $\bar{\Delta L}_{28d}$ , propuestas según las deducciones 28ª, 30ª y 33ª son iguales e integralmente válidas para la calificación y cualificación correspondiente

de TODOS los cementos de mezcla PA y PIZ (constituídos por Portland y Pozzolana(s) únicamente) para cada fin citado, con la única aclaración adicional de que para que estos últimos puedan ser igualmente calificados de elevada RS mediante el método ASTM C 452 (las dos versiones), el valor máximo permisible correspondiente y especificado del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  es el 0,054%.

31\*.- Como era de preveer los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, ensayados,

- según el método L-A, resultaron calificados y/o confirmados como tales, es decir, de no elevada o elevada RS, respectivamente, tanto a la edad de 28 días como a la de 90 días, puesto que el  $\Delta\emptyset_{28d}$  de la torta respectiva llegó, o no, a sobrepasar, respectivamente, el valor del 1,25%. No obstante de entre los 6 P, dos de ellos, el P-31 y el P-5 resultaron ser de moderada RS puesto que el  $\Delta\emptyset_{28d}$  de sus tortas respectivas no sobrepasó el valor del 4,00% propuesto a la luz de este trabajo, véase la deducción 30\*.
- según el método ASTM C 452, otro tanto, puesto que el  $\bar{\Delta}L_{14d}$  de sus probetas respectivas resultó ser mayor o menor, respectivamente, del 0,040% según la norma ASTM C 150-84a. No obstante en este caso tan sólo un cemento de los 6 P, el P-5 ha podido ser calificado de moderada RS, puesto que el valor del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  de sus probetas respectivas no sobrepasó el 0,073% propuesto a la luz de este trabajo, véase la deducción 30\*.
- según el método HIBRIDO-1, casi otro tanto, puesto que el  $\bar{\Delta}L_{28d}$  de sus probetas respectivas resultó ser mayor o menor, respectivamente del 0,044% según la propuesta surgida a la luz de este trabajo, véase la deducción 30\*; aunque no obstante y en este caso ha habido dos excepciones apreciables que han sido,
  - . la del cemento P-5 que por su contenido de  $C_3A$ , 8,0%, debe ser calificado de moderada RS según la norma ASTM C 105-84a, mientras que por su valor del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  de este método H-1 debería ser calificado de elevada RS,  $0,044\% > 0,041\%$ , y
  - . la del cemento PY-5 al que le ocurre todo lo contrario, es decir, que por su contenido de  $C_3A$ , 4,50%, debe ser calificado de elevada RS mientras que por su valor del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  de este método de ensayo H-1 debería ser calificado de moderada RS,  $0,047\% > 0,044\%$ , pero ello es idéntico tributo al que actualmente se ha de pagar con el método normalizado de ensayo ASTM C 452-75.

32\*.- Las clasificaciones, y calificaciones correspondientes, que se han obtenido de todos y cada uno de los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, y de

mezcla, 15 PA y 9 PUZ (éstos constituidos únicamente por Portland y Puzolana) y 8 PUZ industriales, ensayados a través de los métodos acelerados de ensayo de L-A, ASTM C 452 e H-1, respectivamente, y mediante los valores de sus parámetros respectivos,  $\Delta\bar{O}_{28d}$  e  $\bar{\Delta}L_{28d}$ , y contenido de  $C_3A$  (%) en el caso de los portland, colocados en el orden que mas conviniere a cada caso, véase Tablas 27, 70, 74 y 79, han resultado ser relativamente bastante coincidentes.

No obstante y entrando en algo mas de detalle se tiene que:

1º.- Del estudio comparativo de las diversas clasificaciones obtenidas, véase Tabla 27, de los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, en función

- del contenido de  $C_3A$ ,
- del  $\Delta\bar{O}_{28d}$ , método L-A,
- del  $\bar{\Delta}L_{14}$  ó 28 d., método ASTM C 452, y
- del  $\bar{\Delta}L_{28d}$ , método HIBRIDO-1

se deduce que la obtenida mediante el método ASTM C 452 ha resultado ser la mas concordante de todas, con la primera, o sea con la obtenida mediante el contenido de  $C_3A$  de cada uno de ellos, lo cual no es indicio claro y evidente como para poder decir con fundamento que el mismo es el MAS PRECISO DE TODOS.

No obstante tales discrepancias clasificatorias obtenidas se han debido fundamentalmente y entre otros a la distinta finura de molido o superficie específica de los mismos, siempre que su contenido de  $C_3A$  ha oscilado del 5,0% al 15,0%, pues en caso contrario aquel parámetro en cuestión no ha tenido trascendencia alguna en favor de los restantes, contenido de  $C_4AF$ ,  $C_3S$ ,  $C_2S$ , etc., tipo y grado de cristalinidad diversos, del clinker respectivo, AQ, cálculos de Bogue, técnica operatoria, cantidad de agresivo, etc., etc.

2º.- Y del mismo modo se tiene que las ocho clasificaciones realizadas de los ocho Cementos Puzolánicos Industriales, tan sólo las derivadas de su

- contenido de  $Al_2O_3$  (%) parcial, según RC-75 (1), respectivo
- ensayo de Fratini ( $[CaO]$  en la fase líquida)
- ensayo ASTM C 452-68 ( $\bar{\Delta}L_{14}$  y 28d.), y
- ensayo HIBRIDO-1 ( $\bar{\Delta}L_{14}$ , 28 y 90 d.)

han resultado ser las más coincidentes de todas. No obstante todas ellas, menos la derivada de su ensayo de L-A ( $\Delta\bar{O}_{28d}$ ), agrupan a los mismos en dos sub-grupos bien diferenciados,

- un sub-grupo, formado por los cementos PUZ-8, PUZ-6, PUZ-4 y PUZ-5, y,

- otro sub-grupo, formado por los cementos PUZ-3, PUZ-2, PUZ-7 y PUZ-1,

cuyos componentes de cada sub-grupo, se encuentran, por lo general, cambiados de orden según la clasificación y método de ensayo que se considere. Por lo que según ello y los métodos de ensayo ASTM C 452 e H-1 únicamente, el mensaje proporcionado tanto por el simple análisis químico de un cemento puzolánico como por el ensayo de Frattini del mismo son también un leve indicio de su más que probable comportamiento en un medio agresivo sulfático, pese a lo cual y si su contenido de  $Al_2O_3$  (%) resultare elevado y mayor de 7,5% presumiblemente,

- el ensayo de Frattini lo deberá cumplir sobradamente, y en

- el ensayo ASTM C 452, el  $\bar{\Delta}L_{28d}$  de sus probetas deberá ser mayor del 0,054% (y aumentar el mismo  $\bar{\Delta}L_7$ , 14 y/o 28d. con la adición de puzolana en caso de que la misma se conociere de antemano),

es decir, en tales casos la(s) puzolana(s) constitutiva(s) bien podría(n) parecerse a la C y/o CV-10 y/o M empleadas para la realización de este trabajo.

No obstante y en cualquier caso como el anterior u opuesto, habrá de serle confirmado, antes de su puesta en obra, su grado de RS mediante alguno(s) método(s) acelerado(s) de ensayo adecuado(s) para tal fin, véase Cap. XII Aplicaciones.

33\*.- Por lo general, los valores del parámetro  $\bar{\Delta}L/g.$  cemento ,correspondientes a cada cemento portland P ó PY sólo o con adición de Puzolana únicamente, ensayado mediante el método ASTM C 452-68 y mediante el método H-1, han resultado ser:

33\*1.- En el caso de los doce cementos portland, 6 P y 6 PY, claramente superiores, los del método H-1,

- durante todo el ensayo, en el caso de que el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado haya sido  $\leq 9,30\%$  (con la excepción del PY-2, 1,23%  $C_3A$ ), y tan sólo

- desde la edad de 120 días en adelante, en caso contrario, es decir, contenido de  $C_3A > 9,30\%$ .

33\*2.- En el caso de los 25 cementos de mezcla PA y/o PUZ preparados con cada una de las puzolanas D, N, O, A, C, M, CV-10 y CV-19, respectivamente, apreciable e incluso notablemente en ocasiones, superiores, los del método H-1, y



33<sup>a</sup>.3.- En el caso de los 3 cementos de mezcla PUZ industriales, apreciable e incluso notablemente, superiores, los del método H-1.

Todo lo cual justifica sobradamente las posibilidades reales de utilización tecnológica del método acelerado de ensayo HIBRIDO-1, y/o cualquier otro similar en su fundamento, para idénticos fines que el ASTM C 452 y mas aún para los cementos de mezcla PA y PUZ. (Esta conclusión confirma la predicción de la interpretación VII.4.1.1.1.2<sup>a</sup>.3<sup>a</sup>.1<sup>a</sup>).

34<sup>a</sup>.- Existe una cierta relación directa entre los valores de los parámetros RMF y RMC de las probetas de 1x1x6 cm de mortero selenitoso ASTM C 452-68 alcanzados a las edades iniciales del ensayo y el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, fruto de la formación de ett-if correspondiente a cada caso y su participación proporcional correspondiente en los mismos.

35<sup>a</sup>.- El efecto expansivo derivado de la formación de la ett-if (y la ett-rr) que se originan en distinta cuantía en la torta y probetas de cada Cemento Portland, P ó PY, solo (....con un contenido de puzolana(s) en exclusiva, del 20% al 40% en peso), respectivamente, aumenta el volumen inicial de las mismas y disminuye su porosidad, ambos a un mismo tiempo, y tanto mas lo segundo que lo primero cuanto,

- mas inicial es la edad de aquellos.
- mayor ha sido la cantidad de yeso púestoles como agresivo.
- mayor ha sido la relación a/c empleada (caso de las probetas).
- mas silícica ha sido la puzolana constitutiva, es decir, la C y N de este trabajo (caso de las probetas preferentemente).
- mas aluminica ha sido la puzolana constitutiva, es decir, la M de este trabajo (caso de las tortas preferentemente).

pero en cualquier caso, dependiendo la supremacía de una u otra acción y sus consecuencias nocivas correspondientes, del distinto grado de endurecimiento de aquellas, tortas y probetas, a cada edad del ensayo.

Estos hechos se confirman aún mejor en los cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes, a medida que mas aluminica es la puzolana con la que se coaligue(n) aquél(los), siendo el mismo la causa de los notabilísimos valores de  $\bar{A}L$ , RMF y RMC sobre todo, alcanzados por las probetas correspondientes a las edades iniciales, principalmente, de las mismas, como ha ocurrido en el caso de la M empleada en este trabajo.

36<sup>a</sup>.- En un sentido muy amplio se podría decir que, en general, la Vu de este tipo de probetas, de 1"x1"x11", H-1, suele disminuir ligeramente con el aumento del contenido  $C_3A$  de su cemento portland constitutivo, lo cual es coincidente con la conclusión correspondiente que se obtendría del parámetro Porosidad. Esta generalización tan amplia no llegó a cumplirse en el caso de los cementos de mezcla PA y/o PUZ correspondientes (véase a propó-

37.- En cualquiera de los tres métodos acelerados de ensayo L-A, ASTM C 452 e HIBRIDO-1, la velocidad de endurecimiento de cada torta o probeta ha guardado una estrecha relación con las cantidades de,

- $Al_2O_3$  de la fracción puzolana (y mas presumiblemente de  $Al_2O_3^{r-}$ ), y
- $C_3A$  de la fracción portland,

ambas constitutivas de aquellas, y por tanto con las cantidades de ettringita derivadas correspondientes y su ACCION SINERGICA resultante en cada caso; siendo además dicha relación,

- directa, con la primera, la ett-rf, o de origen  $Al_2O_3^{r-}$  de la puzolana, según su cuantía, de aquí en ocasiones su menor nocividad, e
- inversa, con la segunda, la ett-lf, o de origen  $C_3A$  del cemento portland en casi todos los casos -menos cuando ha existido una notable ACCION SINERGICA en su formación conjunta con la ett-rf-, de aquí que en todos ellos la nocividad haya resultado ser elevada por su causa, o sea, por formarse en su totalidad bastante mas lentamente que el tiempo de endurecimiento de la torta y probeta correspondientes.

No obstante y en cualquier caso, ambas son,

- + la causa directa del distinto grado de nocividad de la ACCION SINERGICA correspondiente registrada en aquellas, torta y probetas, y edad sobre todo inicial de las mismas, siendo por contra
- + la causa indirecta, el grado de endurecimiento del entorno que rodea a aquellas, ett-rf y ett-lf, en el instante mismo de su formación, de modo y manera que tanto en torta como en probetas, si aquél es,
  - mínimo o nulo (estado plástico o pseudo-plástico de la torta o probetas), y la ett-lf también, la ett-rf no se opone y participa en alguna medida en aquél - efecto de auto-aceleración del fraguado y endurecimiento de aquellas torta y/o probetas, por la puzolana M de este trabajo, con auto-colmatación resultante de su porosidad inicial por la ett-rf correspondiente y ett-lf en su caso-, y si aquél es
  - máximo, aquella, la ett-lf, acaba minimizándolo de nuevo,

- . bien mediante el reblandecimiento de las mismas (estado incoherente de la torta y/o probetas a modo de masa pastosa selenitosa que la(s) constituya respectivamente),
- . bien mediante su fragmentación, troceándolas.

Todo ello siempre que ha existido cantidad de yeso suficiente para dicho fin, caso de los métodos acelerados de ensayo Le Chatelier-Anstett (= 33,33% de yeso) e HIBRIDO-1 (= 45,20%), que no del ASTM C 452 en cuyo caso tal ACCIÓN SINÉRGICA ha sido eminentemente POSITIVA para la consecución de valores elevados a edades iniciales de RMF y RMC, no refrendables por lo común con elevadas RS.

38ª.- Según este método acelerado de ensayo HIBRIDO-1, la nocividad de la  $\text{etf-lf}$   $\text{l}^{\text{ria}}$  se ve apreciablemente disminuida en todas las probetas, además de por el grado de finura de molido ó superficie específica de los reactivos, en especial del cemento portland, por las características porosidad y falta de fraguabilidad y endurecimiento rápido, principalmente, del propio mortero tan selenitoso que las constituye. De aquí que el efecto expansivo inherente a la formación de aquella  $\text{l}^{\text{ria}}$  provoque en todos los casos una colmatación de las probetas en todas las edades iniciales del ensayo y todo lo contrario, ya  $\text{z}^{\text{ria}}$ , una vez endurecidas las mismas hasta su auto-destrucción selenitosa a las edades posteriores, si existe  $\text{C}_3\text{A}$  necesario y suficiente para ello.

39ª.- De los tres parámetros aquí utilizados en el método de L-A,  $\Delta\theta$ ,  $\text{Vc}\theta$  y PAV, los dos primeros,  $\Delta\theta$  y  $\text{Vc}\theta$ , poseen bastante mayor sensibilidad, poder de discriminación, resolución y ordenamiento, que el último, PAV, para poder calificar, y clasificar en su caso, a los cementos portland solos o de mezcla con Puzolana(s) únicamente PA y/o PUZ ensayados, como de elevada o moderada RS. No obstante tal parámetro PAV, aunque fundamentalmente queda como complementario de aquellos para una mejor y mas completa interpretación de los valores de los mismos, ha sido de interés tecnológico para el caso de los cementos de mezcla PA y PUZ citados y sobre todo la(s) puzolana(s) que lo(s) conforma(n).

40ª.- De los parámetros RMF, RMC, Porosidad,  $\text{Vu}$  y  $\text{SO}_{410\text{p}}^=$  determinados mediante su técnica experimental respectiva, se puede decir que,

- en el método de ensayo ASTM C 452 los cuatro primeros sobre todo, y
  - en el método de ensayo HIBRIDO-1, el último sobre todo
- carecen de grado de sensibilidad, poder de resolución, discriminación y ordenamiento necesarios y suficientes para calificar, cualificar, clasificar y diferenciar nítidamente a los cementos portland de elevada RS de los que lo son menos o nada. De aquí que las clasificaciones correspondientes que se obtendrían de los doce cementos portland, 6 P y 6 PY

y de los de mezcla correspondientes, ensayados en función de cada uno de ellos, resulten alejados de la realidad. Asimismo también carecen del poder explicativo necesario y suficiente para poder interpretar acertadamente los fenómenos físico-químicos ocurridos en cada probeta, dado que, en ocasiones los valores correspondientes han sido contradictorios, en especial en lo que se refiere a los parámetros Porosidad y Vu.

Por otra parte, en el caso de que se utilice el parámetro Porosidad, determinado mediante la técnica experimental empleada en este trabajo, para dicho fin citado anteriormente, podrá serlo únicamente en morteros muy selenitosos, o sea, de contenido de  $\text{SO}_3$  de su mezcla-conglomerante cemento a ensayar más yeso superior al 14,0%, Y ACOMPAÑADO INELUDIBLEMENTE POR ALGUNO(S) OTRO(S) PARAMETRO(S) DE RM, preferentemente RMF, RMT y RMC, por este orden de mayor a menor preferencia, que será(n) el(los) que en definitiva lo(s) califique(n) y clasifique(n). De aquí que entre otras cosas el grado de correspondencia entre los valores de los parámetros Porosidad y del parámetro Vu no haya sido el esperado, ya que por lo general, tan sólo ha existido algo de tal correspondencia entre puzolanas muy extremas, caso de la M y la D ó N, que no con el resto, caso de la O, A, C, CV-10 y CV-19.

No obstante tales parámetros para lo que si han servido apreciablemente ha sido como complemento de la investigación científica encaminada a averiguar la(s) posible(s) causa(s) de cada comportamiento concreto.

4.º.- En el Capítulo XII Aplicaciones, se verá la posibilidad real de utilización adecuada del método acelerado de ensayo de Le Chatelier-Anstett y/o ASTM C 452 y/o HIBRIDO-1, respectivamente, para tratar de alcanzar todos y cada uno de los objetivos correspondientes, no dejando de reconocer que:

1.º.- En todos ellos y en determinados casos, el margen de error derivado de la técnica operatoria del propio método acelerado de ensayo y/o de la(s) persona(s) encargada(s) en ejecutarlo(s), puede(n) englobar, en ocasiones, las escasas variaciones de  $\Delta 0$  ó  $\Delta L$  exigibles para emitir un determinado diagnóstico, el cual puede salir menoscabado en su grado de precisión necesario correspondiente.

2.º.- En el caso del método L-A, existen una serie de dificultades de puesta en práctica, operatividad, agilidad y facilidad de manejo, subsanables en parte por el método HIBRIDO-1; no obstante y además, sobre ambos puede pesar bastante la crítica de su elevadísima severidad, rallana en lo irreal, según algunos ..., la cual podrían hacerlos desaconsejables para muchos ... pero no quizás para aquellos

otros que tengan que proyectar o bien juzgar, calificar, cualificar y/o decidir, a la luz de sus dictámenes respectivos.

42\*.- Que tanto los FUNDAMENTOS de este trabajo, como sus Conclusiones, Aplicaciones y Consejos Prácticos, pueden ser íntegramente aplicables, fácil y económicamente donde y cuando convenga, hubiere lugar o fuese preciso, Científica y Tecnológicamente, por todos los investigadores, fabricantes y usuarios nacionales y/o extranjeros de la industria de la construcción y sus afines, cementos, hormigones, etc., interesados en esta temática - el conocimiento preciso del "carácter" o probabilidad de comportamiento de la(s) Puzolana(s) de su comarca -, sin más que emplear para dicho fin similares puzolanas "referenciales" a la D y M, respectivamente, empleadas en este trabajo.

43\*.- Que a lo largo y ancho del presente trabajo de Tesis Doctoral, ha quedado justificada sobradamente la necesidad urgente de un método acelerado de ensayo para tratar de:

- a) Calificar de "elevada resistencia, ó no, al ataque de los iones sulfato" a cualquier cemento de mezcla PA y PUZ, industrial o de laboratorio, y clasificarlo en su caso en un estudio comparativo de varios.
- b) Determinar, en su caso, el grado de susceptibilidad al ataque de los iones sulfato de una puzolana dada, y si fuera necesario, la clasificación resultante, en función del mismo, del estudio comparativo de varias,
- c) Caracterizar y cualificar, ó no, - Grado de idoneidad - a una Puzolana dada para un fin determinado,
- d) Deducir el contenido relativo de  $Al_2O_3^{r-}$  de cada una de las Puzolanas anteriores, respecto de las demás.

Y esta necesidad se hace más urgente aún, dado que en el futuro inmediato y por motivo del ahorro energético fundamentalmente, el consumo de los cementos de mezcla PA y PUZ, entre otros, se incrementará notablemente a favor de los segundos, PUZ, máxime si en la última reunión anual de fabricantes españoles de cementos se ha demostrado que 9,75 Tms. de adiciones activas suponen un ahorro energético de 1 Tm de fuel-oil (277), lo cual indica la necesidad de abundar razonada y razonablemente por este camino hasta alcanzar el máximo ahorro energético posible para cada objetivo concreto.

44\*.- En el caso de tener que emplear puzolanas tipo diatomita o similares, pudiera ser necesario aumentar por encima de lo común la dosificación del cemento de mezcla correspondiente por  $m^3$  de hormigón, para alcanzar los valores de RM necesarios.

45.- En función de lo que se cita,

- respecto del aumento o consecución de RS, en los CPG XI.8°.1 y 2 (y parte final del mismo) y 9° (parte inicial), 13° (en el supuesto de que la puzolana no sea eminentemente "silícica", y sí en cambio cualquier otra adecuada para el fin expuesto, mayor y lógicamente una silico-aluminosa o similar, natural y/o artificial), y 14°,
- respecto del aumento o consecución de RM elevadas a edades iniciales especialmente en los CPG XI.8°.3, 11°, 19°, 20°, y
- respecto de la búsqueda del cemento de mezcla Portland más Puzolana(s) más adecuados a cada caso que minimicen el costo y garanticen su durabilidad en el CPG XI.21°,

se ha de convenir que según los dos objetivos primeros anteriores, tanto la búsqueda de una puzolana eminentemente silícica ó aluminica, respectivamente, así como en su caso, una natural ó artificial (entre ambas extremas anteriores), más ADECUADA (según cada objetivo anterior) para el Clínter Portland que tradicionalmente produce una fábrica de cemento

dada -la(s) cual(es) por probabilidades en la mayoría de las ocasiones puede(n) encontrarse demasiado lejos de dicha fábrica para su posible empleo y comercialización, cuando nó fuera de España (Silica Fume, por ejemplo)-, puede llegar a originar no pocas dificultades para el fabricante del cemento correspondiente. Por ello y ateniéndonos a la realidad industrial imperante en la mayoría, quizás, de las fábricas de cemento,

que no es otra que la de disponer sólo de la(s) puzolana(s) que "se puede(n)" (generalmente la ceniza volante de la central térmica más próxima a la fábrica de cemento en cuestión), y nó en cambio de la(s) que "se quiere(n)" ó mejor "desearía(n)", se habrá de redosificar el crudo -el cual puede resultar ser más o menos diferente al que tradicionalmente fabricaba- para obtener el Clínter Portland más ADECUADO para tratar de alcanzar en lo posible cada objetivo anterior ó al menos aquél que le proporcione,

- los mayores valores posibles (dentro de norma) de RMF y RMC a 1,2,3,7 y 28 días, y/o
- los mejores comportamientos en RS,

lo cual y en principio puede llegar a ser más factible para dicho fabricante que lo primero.

\* Nota.- Pero en cualquier caso la participación de las mismas, ya sean silícicas ó aluminicas, en RM, se verifica mayormente durante los primeros 28 días del ensayo, en todos los casos, y no a edades posteriores y tardías (a las cuales la que participa precisamente es la fracción portland P ó PY, acompañante correspondiente) como se venía creyendo. Y tanto antes aún de la edad de 28 días, cuanto más eminentemente aluminica sea la puzolana de que se trate y viceversa, cuanto más eminentemente silícica.







#### XI.- CONSEJOS PRACTICOS GENERALES

1º.- Según la CG IX, 1ª, TODOS los Cementos Portland con Puzolana(s) Únicamente hasta un 40% en peso de esta(s) última(s), NO SE PUEDEN CALIFICAR DE ELEVADA O MODERADA RESISTENCIA AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO, en general, y de calcio (yeso), en particular, existiendo entre los mismos similar grado de variabilidad de comportamiento, elevado, moderado y escaso, aplicable aún dentro de cada grupo citado, ante dicho ataque, al igual que ocurriere entre los portland. Por lo tanto y desde el punto de vista del ataque sulfático agresivo, a aquellos NO SE LES PODRA CONSIDERAR EN ADELANTE como un TODO UNICO, HOMOGENEO E INDIVISIBLE, ni aconsejarse directa o indirectamente su uso indiscriminado ante el mismo, por lo que previamente y antes de su puesta en obra se les deberá o tendrá, según el grado de agresividad del medio, que determinar su grado de adecuación correspondiente mediante algun(os) método(s) acelerado(s) de ensayo adecuado(s) para tal fin (véase Cap. XII Aplicaciones).

2º.- En contra de la opinión generalizada existente al respecto y según los resultados experimentales obtenidos, se puede decir que por lo general, los Cementos Portland con Adiciones Puzolánicas Únicamente de hasta un 20% en peso, 80/20, "NO MEJORAN O AUMENTAN" comunmente el grado de RS de su Cemento Portland matriz constitutivo sólo", o sea, no poseen un grado de RS superior al de este último sólo, SINO MAS BIEN TODO LO CONTRARIO.

Sin embargo tal "MEJORA O AUMENTO DE RS", o sea, que poseen un grado de RS superior al de su Cemento Portland matriz constitutivo solo, se origina por lo común en los correspondientes Cementos de mezcla 60/40, o sea, con un 40% en peso de Puzolana(s).

Y sin que además por ello, éstos, los 60/40, hayan tenido que ser calificados de moderada o elevada RS en todos los casos, y aquellos, los 80/20, no.

Tales generalizaciones anteriores se verifican con tanta mayor razón cuanto mas aluminica que silícica sea(n) la(s) puzolana(s) constitutiva(s) de aquel(los), y viceversa, en cuyo caso se verificarán con tanta mayor razón cuanto mas celítico y/o alítico sea el Cemento Portland que la(s) acompañe(n), y viceversa.

3º.- Según la CG IX, 2ª, la dependencia del grado de RS o RM a edades iniciales de un Cemento de mezcla constituido por Portland y Puzolana(s), Única y exclusivamente y con un contenido de esta(s) última(s) del 20%, 30% ó

40%, en peso, de la(s) Puzolana(s) que lo constituye(n), hace que la(s) misma(s), en contra de la opinión generalizada, NO PUEDAN CONSIDERARSE TAMPOCO COMO UN TODO UNICO, HOMOGENEO E INDIVISIBLE, sino TODO LO CONTRARIO, y que todas NO HACEN que el grado de RS ó RM a edades iniciales, de su(s) Cemento(s) de mezcla respectivo(s), resulte ser siempre superior al correspondiente a su Cemento Portland, P ó PY, constitutivo sólo, y viceversa, sino tan sólo LA(S) ADECUADA(S) PARA CADA FIN.

4º.- Por lo tanto y según los Consejos anteriores, se confirma que al igual que cada Cemento Portland es un "material específico con características propias" no igual al resto de los numerosísimos componentes de su tipología, a una Puzolana y un Cemento de mezcla constituido por Portland y Puzolana(s) única y exclusivamente con un contenido máximo de esta(s) última(s) del 40% en peso, les ocurre otro tanto, es decir, que cada "especímen" es un "material específico con características propias", diferente de los del resto de los componentes de su tipología respectiva.

5º.- Según la CG. IX, 2ª, y desde el punto de vista de la RS y/o RM a edades iniciales, el vasto mundo de las Puzolanas debería clasificarse, no en función de sus orígenes, sino en función de sus posibilidades respectivas de utilización más adecuada. Y puesto que la misma va a depender en cierta medida (en ocasiones gran medida) de su constitución físico-química, fundamentalmente en forma reactiva, es decir,  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , en adelante se deberían denominar respectivamente,

- ó eminentemente "silícicas", según predomine notablemente la  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  sobre el resto (véase Aplicaciones XII, 2ª y 4ª), ó mejor sus consecuencias tecnológicas correspondientes (puesta de manifiesto mediante el presente trabajo),
- ó eminentemente "aluminicas", según predomine notablemente la  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , sobre el resto (véase Aplicaciones XII, 2ª y 4ª), ó mejor sus consecuencias tecnológicas correspondientes (puestas de manifiesto mediante el presente trabajo),
- ó eminentemente "féricas", según predomine notablemente el  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  sobre el resto, o mejor sus consecuencias tecnológicas correspondientes (puestas de manifiesto mediante trabajos de investigación en curso complementarios de éste y a publicar próximamente por R. Talero),
- ó combinaciones diversas en tales denominaciones anteriores, lo cual viene a confirmar su heterogeneidad mas absoluta, pero siempre con primacía en las mismas de su constituyente predominante respectivo, es decir,
  - . ó sílico-aluminosas (véase Aplicaciones XII, 2ª y 4ª),
  - . ó aluminosilícicas (véase Aplicaciones XII, 2ª y 4ª),
  - . ó férrico-aluminosas,
  - . ó aluminoféricas,
  - . ó sílico-féricas,
  - . ó férrico-silícicas,
  - . ó sílico-alumínico-féricas,
  - . ó ..... etc.,

(las cuales serán lógicas y probabilísticamente las más numerosas; aunque también hay que tener en cuenta aquellas otras Puzolanas Artificiales -Cenizas Volantes- que circunstancialmente poseen  $\text{CaO}$  libre -"calcáreas"- y/o  $\text{CaSO}_4$  -"sulfocálcicas"-, las cuales implícitamente quedan comprendidas en este estudio, pese a su no utilización expresa en el mismo).

No obstante al no existir métodos adecuados, algunos que cuantifiquen exactamente tales contenidos respectivos anteriores -por otra parte, quizás no excesivamente necesarios- en la mayoría de las ocasiones puesto que el comportamiento final de la(s) misma(s) va a depender en gran medida también y entre otros, del tipo de fracción Cemento Portland que la acompañe en cada caso, o mejor, de la cantidad de  $\text{C}_3\text{A}$  que aporte la misma-, las denominaciones citadas habrán de dárseles en función de dicho comportamiento final respectivo, el cual se podrá preveer en principio y en cierta medida merced al Cap. XII Aplicaciones surgidas y propuestas a la luz de este trabajo, según las cuales y para el caso que nos ocupa de las puzolanas comparadas D, N, O, A, C, M, CV-10 y CV-19, las calificaciones respectivas obtenidas mediante los métodos acelerados de ensayo empleados, han sido las siguientes:

- las puzolanas D (confirmación) y N, se pueden calificar de silíceas,
- las puzolanas O y CV-19, se pueden calificar de silico-aluminosas,
- las puzolanas A, C y CV-10, se pueden calificar de alumino-silíceas, y
- la puzolana M, se puede calificar de aluminica.

6º.- Según las CG IX, Cª y Dª y dada por tanto la gran variabilidad de composición físico-química y comportamiento posibles en RS, en RM, etc., de las Puzolanas, tanto en este trabajo como en la realidad, en adelante LA BUSQUEDA DE UN UNICO PATRONAZGO DE UNA DE ELLAS RESPECTO DE LAS DEMAS, en forma de Cementos de mezcla binarios Portland mas Puzolana(s), RESULTARA INNECESARIA, ya que el mismo NO PUEDE SER ABSOLUTO SINO RELATIVO, EN FUNCION DE LA MISION, -Cementos de mezcla Portland mas Puzolana(s), Únicamente, de elevada RS, ó de elevadas RM a edades iniciales que se mantienen con el tiempo, o de RS ó RM equiparables a los Portland, o cementos de albañilería, ó etc.,- A LA(S) QUE SE LA(S) DESEE DESTINAR, pudiendo ser, no obstante, tales patronazgos diversos TOTALMENTE ANTAGONICOS, y definiendo por tanto cada uno de los mismos EL CARACTER y con él LA INTENCIONALIDAD DE COMPORTAMIENTO de cada una de ellas, es decir, SU UTILIDAD MAS ADECUADA en cada caso, con lo cual se comprende mejor el aserto de Bogue cuando dijo: "UNA PUZOLANA DE COMPOSICION IDEAL PARA CADA OBJETIVO O FIN PARTICULAR".

7º.- Según los consejos prácticos anteriores YA NO ES NECESARIO CONOCER DE ANTEMANO EL ORIGEN, o mejor, "LUGAR DE PROCEDENCIA" de una Puzolana dada para saber su probable comportamiento, es decir, SU CARACTER (como

se venía y viene haciendo comunmente), en forma de Cementos de mezcla binarios Portland mas Puzolana hasta un 40% en peso de esta última.

8\*.- Para preparar Cementos de mezcla constituidos por Portland mas Puzolana única y exclusivamente, hasta un 40% en peso de esta última:

8\*1.- DE ELEVADA RESISTENCIA AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO: Se podrá(n) emplear Puzolana(s) "silícicas" igual(es) o similar(es) a la D y N ensayadas en este trabajo, en cuyo caso la(s) misma(s) podrá(n) recibir el calificativo de "ADECUADA(S)" O "APROPIADA(S)" para dicho fin.

No obstante para que cualquier otro tipo de Puzolana, sílico-alumínica ó aluminó-silícica, o etc, se pueda calificar igualmente de ADECUADA O APROPIADA para este fin, el(los) cemento(s) de mezcla del tipo anterior que con ella se prepare(n), habrá(n) de cumplir necesariamente con TODAS y cada una de las especificaciones normalizadas que para el (los) mismo(s) existan en vigor, y además con las especificaciones afines surgidas y propuestas a la luz de este trabajo, véase Cap. XII. Aplicaciones).

En este caso, el clinker portland acompañante deberá ser,

- eminentemente "alítico" ( $\% C_3S \uparrow$ ),
- nada "celítico" ( $\% C_3A \uparrow$  ó mejor = 0,00%, y
- con las limitaciones propias del caso, en cuanto al contenido de  $C_4AF$ ,  $C_2F$  y/o sus s.s.

8\*2.- DE ELEVADA RESISTENCIA:

- AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO,
- AL  $CO_2$  AGRESIVO PARA LA "Cal", y
- A ACIDOS MINERALES DEBILES:

Se podrán emplear las mismas Puzolanas que en el caso anterior. .

En este caso el clinker portland correspondiente deberá ser,

- eminentemente "belítico" ( $\% C_2S \uparrow$ ),
- nada "celítico" ( $\% C_3A \uparrow$  ó mejor = 0,00%,
- con las limitaciones propias del caso en cuanto al contenido de  $C_4AF$ ,  $C_2F$  y/o sus s.s.

8\*3.- DE ELEVADA RMC Y RMF A EDADES INICIALES (3, 7, 14 y 28 días) que se mantienen con el tiempo Y QUIZAS NO ELEVADA RESISTENCIA AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO: Se podrá(n) emplear Puzolana(s) Aluminica(s) igual(es) ó similar(es) (C y CV-10) al menos, a la M ensayada en este trabajo, en cuyo caso la(s) misma(s) podrá(n)

recibir el calificativo de "ADECUADA(S)" o "APROPIADA(S)" para dicho fin.

No obstante para que cualquier otro tipo de puzolana silico-alumina ó aluminosilícica, o etc, se puede calificar igualmente de ADECUADA O APROPIADA para este fin, el(los) cemento(s) de mezcla del tipo anterior que con ella se prepare(n), habrá(n) de cumplir necesariamente con todas y cada una de las especificaciones normalizadas para el (los) mismo(s) existan en vigor, y además con las especificaciones afines surgidas y propuestas a la luz de este trabajo, véase Cap. XII. Aplicaciones.

En este otro caso, el clinker portland acompañante deberá ser también eminentemente "celítico" ( $\% C_2S \uparrow$ ), e igualmente "celítico" ( $\% C_3A \uparrow$ ) únicamente en el supuesto de que adicionalmente no se le exija un grado de RS determinado.

Este último caso deberá ser el mas común en la realidad.

No obstante y en cualquier caso tanto el grado de finura de molido ó superficie específica del clinker empleado y de la(s) Puzolana(s) que le acompañe(n), como la cantidad de Yeso utilizada como regulador de fraguado en cada ocasión serán las ADECUADAS u OPTIMAS, para cada fin propuesto, véase la Aplicación XII.10<sup>a</sup>.

3<sup>a</sup>.-- Según las CG IX, 2<sup>a</sup> y 3<sup>a</sup>, pueden existir PUZOLANAS (probabilísticamente las mas numerosas), -caso de la O, A, C, CV-10 y CV-19 del presente trabajo- que, desde el punto de vista de la resistencia al ataque de los iones sulfato, y en forma de cementos de mezcla constituidos únicamente por las mismas y fracción portland P ó PY, tienen la propiedad de poseer un único comportamiento, "carácter", (no común ni cuali ni cuantitativamente con el resto), el cual se puede manifestar de forma totalmente distinta según sea P ó PY el cemento portland matriz que la acompañe en cada caso, de modo y manera que,

- "elevan o aumentan la no elevada RS del cemento portland matriz P acompañante solo con el que se mezclan hasta el punto de poder llegar a hacerlo en ocasiones quizás incluso de moderada o elevada RS", o mejor, que el (los) cemento(s) de mezcla resultante(s) (preferentemente el 60/40 que no el 80/20 hermano) pueden llegar a poseer un grado de RS superior al de su cemento portland matriz constitutivo solo, pudiendo incluso quizás llegar a ser calificado(s) alguno(s) de -aquel(los) en ocasiones de moderada (si el contenido de  $C_3A$  de este último oscila del 7%-8% al 15% y el  $C_3S$  es mas bien bajo) ó elevada RS;

y todo ello tanto mas cuanto mayor sea el contenido de  $C_3A$  del cemento portland P con el que se mezclaren, y viceversa, y debido a la actuación global de aquella preferentemente como diluyente o dispersante de éste último o sea a modo de un inerte<sub>RS</sub> o similar, y

- "disminuyen o menguan la elevada RS del cemento portland matriz PY acompañante solo con el que se mezclan hasta el punto de poder llegar a hacerlo en ocasiones quizás incluso de moderada o no elevada RS", o mejor, que el (los) cemento(s) de mezcla resultante(s) (preferentemente el 60/40 que no el 80/20 hermano) pueden llegar a poseer un grado de RS inferior al de su cemento portland matriz constitutivo solo, pudiendo incluso quizás llegar a ser calificado(s) alguno(s) de - aquel(los) de moderada o no elevada RS; y todo ello tanto mas cuanto mayor sea el contenido de  $C_3A$ ,  $C_4AF$  y  $C_3S$  del cemento portland PY con el que se mezclaren, y viceversa, y debido a la actuación global de aquella preferentemente como puzolana debido a su  $Al_2O_3^r$  constitutiva y la posible ACCION SINERGICA (véase Deducciones X.3ª, 4ª, 5ª, 6ª y 37ª resultante, con la escasa, pero no nula cantidad de  $C_3A$  que le acompañe, véase a continuación el CPG. XI.38ª.

10ª.- Según la CG IX, 3ª, la presencia de un Cemento Portland de elevada RS, PY, en cualquier Cemento de mezcla binario, Portland PY mas Puzolana única y exclusivamente, NO GARANTIZARA que aquel(los) también sea(n) de elevada RS, pues en ocasiones, y si la(s) Puzolana(s) que lo(s) constituye(n) no es (son) la(s) ADECUADA(S) para dicho fin, caso de la puzolana referencial M (entre otras) de este trabajo, podrá(n) resultar ser todo lo contrario, o sea, de no elevada RS; asimismo, la presencia en aquél Cemento de mezcla de un Cemento Portland de no elevada RS, P, en lugar del PY, tampoco GARANTIZARA que aquel(los) también sea(n) de no elevada RS, pues en ocasiones, y si la(s) Puzolana(s) que lo(s) constituye(n) en exclusiva es (son) la(s) ADECUADA(S) para dicho fin, caso de la puzolana referencial D (entre otras) de este trabajo, podrá(n) resultar ser todo lo contrario, o sea, de elevada RS. A continuación véase la Deducción X . 2ª.

11ª.- La mayoría de los Cementos de mezcla de este trabajo constituidos únicamente por Portland, P ó PY, y puzolana M hasta un 40% en peso de esta última, tienen la propiedad o el dualismo de poder ser considerados a un mismo tiempo como,

- Cementos Portland con Adiciones Puzolánicas Únicamente,

. hasta un 20% en peso de estas últimas, y/o

. hasta un 40% en peso de estas últimas, y

y con el 7,0% de  $\text{SO}_3$ ,

- Cementos EXPANSIVOS, tipo M-S (si la fracción portland constituyente es P) o tipo M (si la fracción portland constituyente es PY), o mezcla de ambos Tipos anteriores, o al menos,
- Cementos de mezcla de elevada RM iniciales que se mantienen al menos con el tiempo.

No obstante ello no ha implicado obligatoriamente que los mismos tengan que ser además de moderada o elevada RS, ya que en este otro sentido todos ellos han resultado ser, en mayor o menor grado, de no elevada RS.

Por lo tanto y en tal caso se les tendrá que determinar necesariamente dicho grado de RS respectivo, para la aceptación o rechazo del (los) mismo(s), -antes de su utilización en obra en terrenos selenitosos-, y mediante algún(os) método(s) acelerado(s) de ensayo adecuado(s) para tal fin, (véase Cap. XII. Aplicaciones).

- 12<sup>a</sup>.- En contra de la opinión generalizada, el curado muy esmerado, en calidad, cantidad y tiempo -24 horas en C.H. y 14 días bajo agua desionizada, método L-A- de los Cementos de mezcla PA, 80/20, y PUZ, 70/30 y 60/40, preparados con cada una de las Puzolanas del presente trabajo y Cemento Portland P ó PY, única y exclusivamente, NO HA ASEGURADO TOTALMENTE la práctica inatacabilidad de aquellos ante el ataque sulfático agresivo, ya que dicha inatacabilidad, no ha dependido en exclusiva de aquél, sino que, en el supuesto de que la fracción cemento portland constituyente haya sido la adecuada en todos los casos, o tipo PY, aquella ha dependido bastante mas del TIPO DE PUZOLANA empleada en su preparación; y si dicha fracción cemento portland acompañante no ha sido la adecuada, o tipo P, de ambos, fracción P y fracción Puzolana. Por lo tanto en este trabajo tal tipo de curado de 14 días bajo agua desionizada, especialmente tan sólo ha resultado ser beneficioso para aumentar el buen comportamiento de la(s) PUZOLANA(S) ADECUADA(S) empleada(s) para dicho fin, elevar la RS, caso de las silícicas D y N del presente trabajo, y viceversa, en cuyo caso las ha hecho MENOS ADECUADAS AUN, caso del resto y especialmente de la aluminica M.

(Por todo lo cual, en adelante no se podrá decir que el método acelerado de ensayo de Le Chatelier-Anstett"... es discriminatorio, en el sentido de que trata peor a los Cementos Puzolánicos que a los Portland, o mejor a éstos que a aquellos...." (243), SINO TODO LO CONTRARIO).

- 13<sup>a</sup>.- Según los resultados experimentales obtenidos, en el caso del empleo en la realidad de Puzolanas eminentemente silícicas, tales como la D y N de este trabajo, para la preparación de un Cemento de mezcla

de elevada RS, constituido únicamente por la(s) misma(s) y Cemento Portland, tan sólo las condiciones de curado exigibles ó aplicables a su hormigón correspondiente por las características propias de la obra civil al que se le destina -comunes o normales ó bien máximas o muy esmeradas-, condicionarán el contenido de  $C_3A$  de dicho Cemento Portland matriz acompañante de aquella(s). De modo y manera que para el mismo fin, Cemento de mezcla, Portland más Puzolana(s) silícica(s) únicamente, de elevada RS, el contenido de  $C_3A$  de aquél podrá ser aproximadamente de dos a cuatro unidades de diferencia, a lo sumo, según tales casos posibles citados, es decir,

- con condiciones de curado comunes o normales, podrá ser de un contenido de  $C_3A$  del 5% al 7%, a lo sumo, y
- con condiciones de curado máximas o muy esmeradas en calidad, cantidad, tiempo y forma (véase Cap. XII Aplicaciones), podrá ser de un contenido de  $C_3A$  del 8% al 10% u 11%, a lo sumo.

No obstante y en cualquier caso al cemento de mezcla correspondiente elegido para confeccionar dicho hormigón, se le habrá de confirmar, antes de su puesta en obra y mediante algún(os) método(s) acelerado(s) de ensayo apropiado(s) (véase Cap. XII Aplicaciones) su grado elevado de RS. Tal cemento de mezcla elegido en cada caso anterior deberá de ser preferentemente el de la proporción 70/30 si no se conoce el contenido de  $C_3A$  del Portland P ó PY que acompañe a la puzolana silícica. Tan sólo si el contenido de  $C_3A$  del mismo está comprendido entre el 5% y el 10%, deberá tener preferencia sobre el resto la mezcla 80/20; en caso contrario la 70/30 seguida de la 60/40 hermanas, por este orden, de mayor a menor preferencia.

142.- El tipo tan concreto, específico y característico de puzolanas "eminente-mente silícicas" están,

+ PRESCRITAS para,

- ) preparar cementos de mezcla PA y/o PUZ de cemento portland matriz P ó PY y puzolana(s) silícica(s) únicamente, cuya calificación sea de elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, en general, y de calcio (yeso), en particular, pudiendo llegar a ser la misma, en muchas ocasiones, superior a la de un Cemento Portland de tales características, según el consejo anterior, sin más que el Cemento Portland matriz con el que se coaligue posea el contenido de  $C_3A$ , ADECUADO, para superar a aquél, y oscilando, por lo general, el ahorro económico en la partida del cemento, en ambos casos, entre el 28% y el 40%, e incluso en ocasiones, superior.
- ) preparar Cementos de mezcla PA y/o PUZ constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s) silícica(s), que posean,



. una apreciable resistencia al ataque de los iones sulfato (generalmente moderada o elevada y obligatoriamente determinable antes de su utilización en obra, véase Cap. XII Aplicaciones) y

. una determinada blancura,

no obstante y en cualquier caso, al (los) hormigón(es) de tal(es) cemento(s) de mezcla se le(s) tendrá que realizar OBLIGATORIAMENTE, un curado muy esmerado en calidad y tiempo (véase Aplicaciones XII, 10ª), antes de entrar en contacto con el agua selenitosa agresiva, sabiendo que en tanto en cuanto mayor sea el tiempo de curado esmerado, más y mejor será el comportamiento de aquél(los) ante el mencionado ataque agresivo, según lo dicho al efecto en el consejo anterior.

- PROSCRITAS para,

) obtener valores de RMC y RNF elevados a edades iniciales de 1, 3, 7 e incluso 28 días, para lo que en ocasiones los valores de RMC y/o RNF característicos podrán ser quizás y en la medida de lo posible, los de las edades, de 60 y/o 90 días, e incluso a edades posteriores. Aunque no obstante y en cualquier caso a los hormigones de cemento de mezcla PA y/o PUZ correspondiente(s) se le(s) DEBERA de realizar un curado muy esmerado en calidad y tiempo (véase Aplicaciones XII, 10ª), ya que el mismo le(s), beneficiará notablemente para la consecución de aquélla(s), y tanto más rápidamente cuanto mayor haya sido el tiempo de curado esmerado.

) preparar hormigones de elevada resistencia a los ciclos HIELO-DESHIELO por lo presumiblemente elevada porosidad de los mismos; por lo que en tales casos se habrá de acudir a otras soluciones adicionales (protección mediante capas superficiales impermeables como emulsiones asfálticas y similares) o distintas (empleo en el Cemento de mezcla para preparar el hormigón de puzolanas adecuadas no silíceas y similares).

) preparar hormigones, que van a estar en contacto con aguas más o menos agresivas, que van a sufrir fluctuaciones en altura a lo largo del año.

159.- Cuando de entre este tipo de puzolanas tan específicas y características se empleen como puzolana un ópalo, ó geiserita, ó roca opalina, ó sílex, etc., rocas todas ellas de gran dureza, de 5,5 a 7,0, en la escala de Mohs, la molienda de las mismas deberá de controlarse adecuadamente al objeto de no desactivarlas por el apreciable aumento de temperatura que pueden sufrir durante la misma. Dicho control de la temperatura tendrá que ser MAS ESTRICTO AUN en el supuesto de que como puzolana silícica se emplearen las cenizas obtenidas de la incineración ADECUADA (tº y tiempo) de la paja y cáscara del arroz.

16º.- Igualmente pero por distinto motivo, si los cementos PA ó PUZ anteriores (constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s) silícica(s)), son para preparar hormigón armado o pretensado, previa y adicionalmente se le tendrá que determinar a la adición puzolánica en general, y obligatoriamente a la tierra de diatomeas o similares, en particular, su contenido de cloruros, desechándose su uso en el caso de que dicho contenido sobrepase lo especificado al efecto.

Por el contrario, si es para preparar hormigón en masa, no se le deberá tener tanto en cuenta el requisito anterior.

17º.- En vista de que tanto la diatomita como el kieselgur y similares, en su estado natural, que es como presumiblemente se va a utilizar en la industria de la construcción, cementos y sus afines, suelen venir acompañados por diversos minerales tales como, arcillas, margas arcillosas, feldespatos, micas, etc., etc., las cuales pueden impurificar aquellos, disminuyéndoles su contenido de  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$ , y sus propiedades en RS derivadas, generalmente por un aporte adicional de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y/o  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de tales minerales citados, y dadas las posibles consecuencias contrarias para poder alcanzar un grado elevado de RS, de éste(os) último(s), es por lo que será necesario conocer todos y cada uno de los minerales anteriores que impurifican a aquellos silícicos, o, al menos, el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  total de estos últimos, para en el caso de que resulte inadecuado, o mejor el cociente S/A de los mismos, poder comprender las posibles anomalías surgidas al uso de la(s) misma(s), ó mejor aún, ensayarlas antes de su puesta en obra, y mediante un método acelerado de ensayo adecuado para confirmarle, ó no, la elevada RS que se desea que posea(n) el (los) cemento(s) de mezcla PA y/o PUZ que con aquella(s) silícica(s) se prepare(n) para tal fin.

Por lo tanto y en definitiva se puede decir que existe la posibilidad real de que aún dentro del grupo de puzolanas tan específico y característico como son las silícicas, pueden existir variaciones apreciables en composición y constitución físico-química como las acabadas de citar que afecten apreciablemente a sus contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y consiguientemente de  $\text{SiO}_2^{\text{r-}}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  de las mismas, que en determinados casos en los que se exija una elevadísima RS, se desaconseje su utilización, por lo que en cualquier caso, se les tendrá que realizar, obligatoriamente el ensayo acelerado citado.

18º.- Cuando la puzolana silícica de que se trate sea un ópalo no se deberá uti-

lizar como árido en exclusiva (para evitar la posible molestia derivada en sucaso de la reacción árido-álcali) y si sólo como puzolana. No obstante cuando las características de la propia obra civil así lo aconsejasen, emplearlo como árido, obligatoriamente parte del mismo se habrá de emplear como puzolana; para lo cual se molerá hasta la finura de molido del cemento portland o superior si es posible, y se mezclará con el mismo en la proporción adecuada para evitar aquella. Y todo ello antes de la utilización en obra del cemento de mezcla propugnado.

19ª.- El tipo tan concreto, específico y característico de puzolanas "eminente-mente aluminicas", están

- PROSCRITAS para preparar cementos de mezcla PA y/o PUZ de cemento portland matriz P ó PY, que se puedan calificar de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, en general, y de calcio (yeso), en particular",

- + PRESCRITAS para obtener RMF y RMC elevadas a edades iniciales de 1, 3 y 7 días, es decir, para preparar cementos expansivos o de altas RM iniciales, o similares de color tradicional ó blanco.

20ª.- El posible peligro derivado de la utilización irracional e irresponsable de puzolanas eminentemente aluminicas, tal como la M de este trabajo y similares, en forma de Cementos Expansivos tipo M-S o tipo M con su "óptimo de yeso" adecuado (véase la Aplicación XII.10ª venidera) puede provenir del notable incremento de volumen alcanzado por los elementos mal hormigonados e inadecuadamente curados (véase la Aplicación XII.12ª, venidera), durante los 7 ó 14 primeros días de su hidratación selenitosa, cuando ya para entonces ha(n) fraguado y endurecido lo suficiente como para no poder soportar en la realidad, esfuerzos expansivos adicionales de origen interno (por no poder ser además de elevada RS) que afectando a su estabilidad de volumen podrían quizás llegar a originar el deterioro de las mismas.

De aquí que se haya de aconsejar racionalidad y responsabilidad en su uso, pues manejados adecuadamente -véase las Aplicaciones XII, 10ª y 12ª venideras- ó sin tales hidrataciones selenitosas endógenas (no poniendo el "óptimo de yeso" para no obtener la "acción sinérgica" máxima, con las ventajas e inconvenientes al caso -causa voluntaria-) y/o exógenas (evitando lo mas posible el ataque ulterior por iones sulfato -causa involuntaria- y práctica ésta la más común en la realidad) y si en cambio mediante agua(s) potable(s) y similares, de la(s) empleada(s) comunmente en el hormignado tradicional, pueden llegar a ser de gran utilidad, pues al evitar con ello en estos casos la formación de etf-rtf expansiva, se dará paso a la de los aluminatos de calcio hidratados diversos correspondientes, tales como  $C_xA_yH_z$  ó  $C_3AH_6$  ó  $C_4AH_{13}$  ó  $C_4AH_{19}$  ,

ó  $C_4AH_x$  ó etc., (según la  $[CaO]$  y pH del medio y relación A/S), alguno(s) de los cuales son también los que se forman en distinta cuantía en la hidratación de los cementos aluminosos y/o portland eminentemente celíticos, cementos éstos ambos que tienen de común cuantitativamente entre sí y con los expansivos, el poder originar también notables valores de RM a edades iniciales (de similar manera pero distinta cuantía a los cementos expansivos entre sí) con apreciable rapidez, y en general ambos lógicamente con una mayor estabilidad de volumen que los expansivos, con las ventajas e inconvenientes al caso.

No obstante y en cualquier caso conviene recordar una vez más que los Cementos de Mezcla constituidos únicamente por Cemento Portland y Pozzolana(s) eminentemente aluminica(s), tendrán las PRESCRIPCIONES y PROSCRIPCIONES propias del caso, según el consejo anterior 19°.

21°.- En cada obra civil concreta en suelos más, menos o nada selenitosos, HABRA DE BUSCARSE EN EL AMBITO DE ESTOS CEMENTOS DE MEZCLA, PA Y/O PUZ, EL COMPROMISO IDEAL (ó "mezcla ideal") ENTRE SUS COMPONENTES, CEMENTO PORTLAND P ó PY (ó Clinker P ó PY en su caso) - PUZOLANA(S) ADECUADA(S) ("calidad" y "cantidad") - REGULADOR DE FRAGUADO ADECUADO ("cantidad" yeso) (y aún dentro de éstos, sus características físico-químicas "ideales" u "óptimas" para cada fin concreto), QUE MINIMICEN EL COSTO Y GARANTICEN SU DURABILIDAD, HABIENDOLE DE REALIZAR OBLIGATORIAMENTE AL ELEGIDO, ANTES DE SU PUESTA EN OBRA, UN ENSAYO ACELERADO ADECUADO, QUE CONFIRME, O NO, LAS PREDICCIONES DE SU PROBABLE Y POSIBLE COMPORTAMIENTO, Y DE ESTE MODO JUSTIFIQUE SU ELECCION.

22°.- La formación de la  $etf$  o de origen  $C_3A$  se auto-acelera cuando la misma se verifica en un medio selenitoso con un contenido de  $SO_4^{=}$  en forma de yeso y expresado como  $SO_3$  del 21,0%, caso del método HIBRIDO-1. Por el contrario, cuando tal contenido ha sido tres veces menor, 7,0%, caso del método ASTM C 452, se estabiliza tanto más pronto, 60 días, cuanto mayores el contenido de  $C_3A$  del cemento portland ensayado, y viceversa, estribando la causa en que tal cantidad de  $SO_3$  del 7,0% de este último método, resulta estequiométricamente, - deficiente para los primeros, caso del P-1 (14,11%  $C_3A$ ), P-2 (11,09  $C_3A$ ) P-4 (10,71  $C_3A$ ) y P-32 (9,30%  $C_3A$ ), y

- suficiente, para el resto.

Por lo tanto y según ello, tal método acelerado de ensayo PREDICE mas que CONFIRMA-CERTIFICA el probable comportamiento de un Cemento Portland dado ante el ataque de los iones sulfato, cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  del mismo, y viceversa.

Tal hecho no ocurre del mismo modo con el L-A e H-1, los cuales por emplear preferentemente para igual fin, el valor del  $40_{28d}$  respectivo, y una mayor dosificación de yeso como agresivo, 15,50% y 21,0% respectivamente, presupone bastante menos que el ASTM C 452, con las ventajas al caso.

Por todo lo cual y según las deducciones X, 4ª, 13ª, 17ª, 26ª y 28ª (anteriores) la edad para poder calificar a los cementos de mezcla correspondientes preparados con aquel(los) y puzolana(s) únicamente, podrá ser también y en principio la de 28 días.

23ª.- El método acelerado de ensayo ASTM C 452 enmascara tanto más la posible nocividad potencial de la fracción portland, P, del cemento de mezcla PA y/o PUZ preparado con una puzolana en exclusiva, cuanto mas aluminica fuere ésta y más celítico aquél, y viceversa, dado que la cantidad inicial común del 7,0% de  $SO_3$  empleada en el mismo no es la necesaria y suficiente para evitarlo. Por lo tanto y según ello, los valores del  $\bar{A}L$  de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ preparados, sobre todo con cemento(s) portland P, y en particular las puzolanas C, CV-10 y M, desde la edad de 60 ó 90 días en adelante de las mismas, no han resultado ser CONCORDANTES ni APROPIADOS para poder certificar las predicciones calificatorias dadas por los correspondientes de las edades anteriores de 14 ó 28 días; de los cuales el último puede ser especialmente indicado para tal fin sea(n) cual(es) fuere(n) la(s) puzolana(s) constitutiva(s) de aquel(los).

Esta confusión no se produjo tan nítidamente en el método de L-A, por el motivo contrario, disponer 15,50% de  $SO_3$  como agresivo inicial común, siendo por tanto el fundamento de este último, junto con la versatilidad de aquél los que justificaron una vez más el llevar a cabo su hibridación correspondiente, la cual ha dado por resultado en esta ocasión el método HIBRIDO-1 con el cual tampoco se origina en los cementos de mezcla PA y PUZ conél ensayados el hecho denunciado al principio de este consejo. Dicho método H-1 no pretende ser el único probable ni el mejor de todos los híbridos posibles, aunque si en cambio su fundamento, véase la deducción 33ª.

- 24<sup>a</sup>.-- La utilización de materiales puzolánicos, considerados como un TODO UNICO HOMOGONEO E INDIVISIBLE en la preparación de morteros (y hormigones) tradicionales de cementos de mezcla PA y/o PUZ, constituidos únicamente por portland y puzolana(s), NO ELEVARA SIEMPRE NECESARIAMENTE el grado de compacidad de los mismos, o lo que es igual no rebajará siempre su grado de porosidad correspondiente, propiedad ésta que suele ser comúnmente sinónimo de una mayor RS de aquellos. Pues con determinadas puzolanas, caso de las silícicas D y N del presente trabajo, y similares, se puede alcanzar dicho objetivo, elevada RS, pese a haber sido notablemente elevado el grado de porosidad de sus morteros selenitosos correspondientes (los cuales también tendrán elevado dicho parámetro pese a no ser selenitoso), y viceversa, caso de la aluminica M.
- 25<sup>a</sup>.-- Se ha de destacar por su notoriedad que en TODOS los ensayos realizados con las puzolanas silícicas D y/o N, respectivamente, mezcladas con cementos portland P ó PY en proporción 80/20, 70/30 y 60/40 en peso, las necesidades de agua de amasado (o compactación en su caso, tortas L-A) para llevarlos a efecto, han resultado ser siempre NOTABLEMENTE SUPERIORES a los de cualquier pasta o mortero tradicional(es) y/o normalizado(s) preparado(s) con un cemento portland ó PA ó PUZ, aumentando por lo general las necesidades de aquella en cada caso, con la cantidad de puzolana D ó N presente en el mismo. Tales necesidades de agua de amasado o relación agua/cemento,  $\frac{a}{c}$ , en el caso de los métodos acelerados de ensayo ASTM C 452-68 e HIBRIDO-1, han oscilado entre los valores 0,6 y 1,0, afectando las mismas apreciable y proporcionalmente a las edades iniciales de 7 a 28 días a los valores de, las RMF y RMC de las probetas de 1x1x6 cm del mortero selenitoso respectivo, pero no en cambio a las de las edades intermedias y finales del ensayo, en las que en general se portaron según lo previsto para tales tipos de morteros selenitosos, llegando a superar incluso netamente a las correspondientes al valor fijo de 0,485 empleado co relación a/c en la otra versión ASTM C 452-75 del primer método, las cuales al inicio del ensayo se habían portado de manera contraria.
- 26<sup>a</sup>.-- Por lo general las probetas de cualquier cemento de mezcla PA y PUZ, ensayado conforme indica la versión C 452-68 ( $\frac{a}{c} = d \neq \text{cnte.}$ ) del método acelerado ASTM, experimentan, a igualdad de edad, un valor de  $\bar{A}L$  algo menor a cuando se ensaya(n) conforme indica la versión C 452-75 ( $\frac{a}{c} = c = \text{cnte.}$ ) del método acelerado en cuestión. Por lo tanto y en definitiva se puede decir con fundamento que la relación  $\frac{a}{c} = c = \text{cnte.}$  "protege" en cierta medida a aquél PA ó PUZ de la acción agresiva de los iones

sulfato, lo cual es contraproducente para el responsable que ha de juzgar, calificar y cualificar a aquél(los) PA y/O PUZ, y con él(los) quizás también a la puzolana que lo(s) constituye(n) en exclusiva, en función de dicha expansividad a una edad, en definitiva a la luz de su dictamen. Ello unido al hecho posible de que la misma pueda ser una ceniza volante de constitución morfológica esferoidal bastante común -lo cual facilitaría un mejor comportamiento reológico de sus mezclas con cemento portland y una reducción de su agua de amasado o relación a/c correspondiente, que traducido a la realidad podría hacer que aún la relación  $\frac{a}{c} = c =$  = cte. = 0,485 (ASTM C 452-75) resultara excesiva y la  $\frac{a}{c} = d \neq$  cte.

0,485 la adecuada, en tal(es) caso(s)-, ha hecho que en las Aplicaciones XII. 3ª, 4ª, 5ª, 6ª y 7ª, surgidas a la luz de este trabajo, en las que sea necesario emplear los métodos acelerados de ensayo ASTM C 452 e H-1, en especial el primero para un fin dado, se empleen obligatoriamente las dos versiones del mismo, o sea, con relación  $\frac{a}{c} = c =$  cte. = 0,485 y relación  $\frac{a}{c} = d \neq$  cte. (método de la "mesa de sacudidas"), habiendo de satisfacer mediante ambas las especificaciones correspondientes.

27ª.- El estudio de una (ó varias) Puzolana(s) dada(s) por medio de las múltiples Aplicaciones surgidas a la luz de este trabajo, debería completarse siempre adicionalmente y si se desea, comparándola(s) con otra referencial ó patrón, según los resultados obtenidos de su análisis químico, de aquí que,

- si del mismo resultare que bien pudiera ser una silícica o similar, se deberá de coger como referencial,

- . una diatomita ó kieselgur bastante puro, ó
- . un ópalo ó geiserita, etc.,

- si del mismo resultare que bien pudiera ser una aluminica o similar, se deberá coger como referencial un

- . un caolín del 50,0% al 60,0% de riqueza, ó
- . un caolín muy puro al que se le añade arena de cuarzo molida hasta que pase por el tamiz de 4900 mallas/cm<sup>2</sup>, en proporción, en peso, 1:1, los cuales y para su utilización como puzolana se calcinarán a 700 °C

durante 2-3 horas, (seguido a ser posible de enfriamiento a temperatura muy baja  $\approx 0^{\circ}\text{C}$  en atmósfera exenta de  $\text{H}_2\text{O}$ ), para convertirlos en metacaolín que será el que propiamente se empleará como referencial,

- si del mismo resultare que bien pudiera ser una sílico-aluminosa ó aluminosilícica, se deberá coger como referencial, la eminentemente silícica y aluminosa anteriores, y por último
- si del mismo resultare que bien pudiera ser una férrica ó similar, se debería coger como referencial
  - . una goethita,  $\alpha\text{-FeO(OH)}$ , ó
  - . una nontronita  $\text{Na}_3\text{Fe}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ , ó
  - . una trevorita  $(\text{Ni, Fe})\text{Fe}_2\text{O}_4$preparada(s) adecuadamente al efecto, ó cualquier otra apropiada para este fin y en el mismo sentido se debiera decir de una sílico-férrica ó aluminosilícica, pero en tales casos, no se ha acumulado la experiencia suficiente, al igual que en el de las sílico, aluminosas, como para aconsejarlo expresamente.

28°.- La problemática tan específica originada por ambos tipos de agua de aguas de amasado d y e en los métodos de ensayo ASTM C 452 e H-1, en el caso del empleo de puzolanas D ó N ó similares, podría quizás muy bien subsanarse, mediante el empleo contrastado del (los) aditivo(s) adecuado(s) a cada caso.

Así por ejemplo,

- en el caso del agua de amasado d, se deberán emplear aditivos reductores de agua de amasado que no menoscaben la trabajabilidad del mortero (hormigón en su caso), y
- en el caso de agua de amasado e,
  - . se deberán emplear aditivos fluidificantes o superfluidificantes, según los casos, para de este modo facilitar la trabajabilidad del mortero (hormigón en su caso), o bien
  - . atenerse a los fundamentos y técnica operatoria derivada de los mismos que se han empleado para el amasado y confección de las probetas correspondientes en este trabajo, véase el apartado VIII.2.1.

No obstante y en el caso de utilización del tipo de aditivo respectivo indicado, los mismos se emplearían siempre y cuando no menoscaben en absoluto el graco de RS y RM de los morteros (u hormigones en su caso) correspondientes, siendo por ello aconsejable su experimentación previa en un Laboratorio especializado antes de su uso.



29º.- En el supuesto de que el (los) contenido(s) máximos permisibles de  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$  a ( $\text{Na}^+$ ) de la Puzolana Problema supere(n) el valor del 2% indicado por la propuesta de norma UNE (155), parece no ser aconsejable la utilización de la misma en la preparación de hormigones por las implicaciones ulteriores a que pudiere dar lugar, conviniendo recordar, al respecto, que tal valor límite máximo del 2% indicado pasa a ser del 1,3% en el caso de la norma correspondiente ASTM C 618 por idénticos motivos.

No obstante y en cualquier caso, lo que sí está claro es que en el supuesto de que tales contenidos de  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$  de la Puzolana Problema a emplear en la preparación de hormigones tradicionales de cementos de mezcla PA ó PUZ, constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s) resulten anormalmente algo elevados, con aproximación y/o incumplimiento de lo especificado expresamente por la(s) normativa(s) anterior(es) citada(s) y en particular la española, será obligatorio el empleo de áridos no reactivos para confeccionar aquellos los cuales deberán cumplir sus especificaciones y normativas correspondientes existentes al respecto sobre no reactividad de áridos, véase norma ASTM C 227 (289).

Por otra parte, del mismo modo se deberán tener en cuenta las especificaciones correspondientes a los posibles contenidos de sustancias orgánicas, sulfuros y sulfatos acompañantes en ocasiones de ciertas puzolanas en especial las de origen orgánico, tales como el kieselgur y similares (293).

30º.- También conviene recordar a propósito que existe la posibilidad de que cualquier cuarcita ó arena cuarcítica ó arenisca, adecuadamente molida, ó polvo de sílice, ó "sílica fume", es decir, con un grado de finura de molido o superficie específica adecuado, quizás pueda cumplir con las características que les son propias a las puzolanas eminentemente silíceas, pese a no tener, como aquéllas, la mayor parte de su  $\text{SiO}_2$  constitutiva como ópalo y si en cambio como  $\alpha\text{-SiO}_2$  en el caso de las derivadas del cuarzo.

31º.- Al objeto de que tanto los errores calificadorios como clasificatorios se minimicen en cierta medida sería aconsejable FIJAR el parámetro finura de molido o superficie específica del cemento ensayado y además en su caso de su clinker portland correspondiente cuando el (los) mismo(s) vaya(n) a ser ensayados mediante los métodos acelerados ASTM C 452 e HIBRIDO-1 ó similar, principalmente. Por lo tanto y en principio tal parámetro superficie específica se podría fijar en el valor de  $2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

32ª.- Para poder calificar a los cementos portland de contenido de  $C_3A$  próximo al valor "frontera" del 5,0%, anterior o posterior, como de elevada, o no, respectivamente, resistencia al ataque de los iones sulfato, es mas preciso para el especialista que lo ha de juzgar, calificar y cualificar para un fin dado, el poderlo hacer mediante el valor del  $\bar{A}L_{14d}$  de sus probetas respectivas de mortero ASTM C 452-75, que mediante las limitaciones puramente químicas existentes al efecto (6), pues siempre un mortero estará mas próximo a la realidad, hormigón, que un análisis químico por preciso que fuere. No obstante, no se deja de reconocer que cualquier aditivo, adición, molienda intencionada o manipulación previa de mala fé, podría(n) afectar al valor del  $\bar{A}L_{14d}$ . - originado por el mismo y consiguientemente a la precisión en el diagnóstico proporcionada por él.

33ª.- Según el consejo 6ª anterior en adelante se hará innecesario, lógicamente, la determinación de LA CALIDAD, a secas, de una puzolana dada, puesto que visto todo lo expuesto hasta el momento en esta conclusión, previamente habremos de preguntarnos TODOS: Determinar la CALIDAD de una Puzolanada dada ¿En función de qué?, ó lo que es lo mismo ¿Con qué fin concreto? ó ¿Para qué?....etc.....

Ya que habrán de ser las posibles características:

1ª.- Constructivas de la obra civil proyectada o por proyectar,

2ª.- Geológicas del terreno donde se vaya a asentar la misma,

3ª.- Agresivas de dicho terreno y/o su entorno,

4ª.- Constitutivas

- del cemento portland que la acompañe

- de la propia puzolana

5ª.- etc.,

las que en cada caso precisen, en función de que objetivo(s) se ha de determinar la calidad mas adecuada ó apropiada de la misma.

34ª.- Los fundamentos de las condiciones especiales de hormigonado, encofrado, desencofrado y curado del hormigón preparado con cementos de mezcla PA ó PUZ constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s) y citados en las Aplicaciones XII.11ª y 12ª (venideras), se deberán hacer extensibles, en general, a TODOS ELLOS sea(n) cual(es) fuere(n) su(s) Puzolana(s) constitutiva(s), ciñéndose estrictamente a tales consejos proporcionados en cada caso cuanto mas eminentemente silícica ó eminentemente aluminica (ó quizás férrica), respectivamente, sea la puzolana constitutiva de aquellos, y vice versa. Por lo tanto y en cualquier caso deberán curarse en general algo mas que el hormigón tradicional de cemento portland -dado que la puzolana constitutiva tenderá a parecerse a las referenciales empleadas en este trabajo, D ó M-, lo cual no asegurará necesariamente la inatacabilidad por los iones sulfato de su hormigón correspondiente, según el Consejo Práctico XI, 12ª.

35º.- En adelante se podrán elevar quizás los valores característicos de las RMF y RMC del mortero normalizado (1) correspondiente y alcanzados a las edades iniciales de 3 a 7 días, especialmente, de los cementos portland de elevada RS, -ya sean PY ó Portland P con diatomeas, rocas opalinas ó similares (véase la Aplicación XII, 13º)-, sin más que añadirles a los mismos las pequeñas cantidades PRECISAS de,

- una(s) puzolana(s) ADECUADA(S)
  - . ó eminentemente aluminica, caso de la M empleada en este trabajo,
  - . ó aluminio-silícica, caso de la CV-10 y C, por este orden de mayor a menor interés, empleadas también en este trabajo, y
- $\text{SO}_3$  ó "óptimo de  $\text{SO}_3$ " (véase la Aplicación XII, 10º) para dicho fin, sin necesidad de someterlos como hasta ahora a un extremado proceso de molienda, en especial a los PY.

36º.- Teniendo en cuenta la Deducción X, 45º, el CPG, XI. 35º y los resultados experimentales obtenidos en este trabajo, no es difícil aventurar con fundamento que la fabricación de los cementos PY como tales puede llegar a desaparecer en alguna(s) fábrica(s) de cemento en un futuro no muy lejano ó inmediato incluso, dada la posibilidad de su sustitución racional en igualdad de condiciones y objetivos por un cemento de mezcla PUZ adecuado (constituido por

- Cemento Portland P, -de un contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  no mayor del 8% (ó el clínker Portland correspondiente más regulador de fraguado adecuado)-, y
- Puzolana natural y/o artificial sílico-aluminosa ó similar mayormente (por ser la que presumiblemente se podrá adaptar quizás mejor para el fin propuesto y además se pueda encontrar con mayor profusión y mejor precio),

en cantidades y finura(s) de molido, ADECUADAS; el cual puede llegar a proporcionar,

- igual o mayor incluso RS que el (los) propio(s) PY, e
- iguales o mayores incluso RM a edades iniciales mayormente que las proporcionadas mediante finura de molido considerablemente elevada, por el (los) PY, merced al aprovechamiento para este fin de la acción sinérgica entre el  $\text{C}_3\text{A}$  de la fracción P y la poca  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{F}}$  de la fracción(es) puzolana(s) sílico-aluminosa(s) ó similares conformantes ámbas de aquél PUZ, junto al regulador de fraguado adecuado, calidad y cantidad, correspondiente para dicho fin, (véase la Aplicación XII, 12º).

Al cemento PUZ preparado con tal característica, elevada RS, se le habrá de confirmar la misma obligatoriamente antes de su expedición y/o utilización en obra, mediante alguno(s) de los métodos acelerados de ensayo que se proponen al efecto en el capítulo XII Aplicaciones.

Este Consejo Práctico General está relacionado con el 9º y 10º anteriores.

37º.- Para tratar de obtener igualdad de actividad puzolánica -no mediatizada anormal y excesivamente por el  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$  (véase al efecto el párrafo final de la Deducción X. 11º)- entre varias puzolanas diferentes en su origen y carácter especialmente, se ha de tener en cuenta que al ser dicha actividad puzolánica función más directa y mayor de su carácter aluminico que de su carácter silíceo principalmente, la puzolana habrá de poseer un grado de finura de molido tanto menor cuanto mas acuciado ó predominante tenga dicho carácter aluminico, y viceversa.

Este Consejo Práctico General está íntimamente relacionado con

- las Deducciones X. 6º y 11º,
- el CPG XI. 35º y
- la Aplicación XII. 10º, 5º. 1 y 2.

38º.- Sin la presencia anormalmente elevada de  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$ , en tanto en cuanto

- mayor actividad puzolánica muestre una puzolana dada
  - . bien per se (en cuyo caso se trataría de una eminentemente aluminica), ó
  - . bien mediante finura de molido notoriamente elevado y tanto mayor cuanto mas silíceo que aluminico sea la misma, y viceversa (en cuyo caso se trataría, de una aluminico-silíceo, silíceo-aluminoso ó silíceo, por este orden de menor a mayor grado de finura de molido correspondiente),
- más celítico, belítico, y menor grado de finura de molido habrá de tener el clínker portland que la acompañe, y
- mayor habrá de ser el óptimo de " $\text{SO}_3$ " del cemento de mezcla resultante, para alcanzar mediante el mismo la ACCION SINERGICA MAXIMA ó valores de RMF y RMC a edades iniciales mayormente, lo más elevados posibles, y quizás también en ocasiones mayores RS.

Este Consejo Práctico General está muy relacionado con el párrafo final del 8º.3 anterior.



TABLA-89

COMPENDIO DE LAS PRINCIPALES CONDICIONES GENERALES :

(E) : QUE DEBERA CUMPLIR UNA PUZOLANA PROBLEMA PARA, SEGUN EL METODO ACELERA - DO DE ENSAYO DE LE CHATELIER-ANSTETT, PODER SER CALIFICADA DE:

SILICICA		Requisitos Fisicos:			
Regulaciones Químicas:	(a):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
	(b):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
Regulaciones Químicas:		Regulaciones Químicas:			
Regulaciones Químicas:	(a):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
	(b):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
ALUMINICA		Regulaciones Químicas:			
Regulaciones Químicas:	(a):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
	(b):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
SILICO-ALUMINOSA		Regulaciones Químicas:			
Regulaciones Químicas:	(a):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
	(b):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
ALUMINO-SILICICA		Regulaciones Químicas:			
Regulaciones Químicas:	(a):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
	(b):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100

AUMENTO O DISMINUCION DE LA RS DE UN CEMENTO PORTLAND PY POR PARTE DE UNA PUZOLANA DADA Wn SEGUN L-4

AL 28 días	PY	Wn	RS PY	PY
PUZOLANA W <sub>2</sub>	(PA 4 PUZ)		Wn	RS PY

T<sub>2</sub> - ESPESAMENTE ESPECIFICADOS EN DISTINTAS NORMAS O SIMILARES

(F) : QUE DEBERA CUMPLIR UNA PUZOLANA PROBLEMA PARA, SEGUN EL METODO ACEL- RADO DE ENSAYO ASTM C 452, Y A IGUALDAD DE VERSION DEL MISMO, PODER SER CALIFICADA DE:

SILICICA		Requisitos Fisicos:			
Regulaciones Químicas:	(a):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
	(b):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
ALUMINICA		Regulaciones Químicas:			
Regulaciones Químicas:	(a):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
	(b):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
SILICO-ALUMINOSA		Regulaciones Químicas:			
Regulaciones Químicas:	(a):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
	(b):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
ALUMINO-SILICICA		Regulaciones Químicas:			
Regulaciones Químicas:	(a):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100
	(b):	$\frac{P_1 (100\% \text{ C}_1 + 0.51 \text{ C}_2 + 0.51 \text{ C}_3)}{P_1 + P_2 + P_3}$	100/100	80% de 100/100	70% de 100/100

AUMENTO O DISMINUCION DE LA RS DE UN CEMENTO PORTLAND PY POR PARTE DE UNA PUZOLANA DADA Wn SEGUN ASTM C452

AL 28 d	PY	Wn	RS PY	PY
PUZOLANA W <sub>2</sub>	(PA 4 PUZ)		Wn	RS PY

## XII.- APLICACIONES

A continuación se exponen una serie de Aplicaciones Tecnológicas surgidas como fruto de este Trabajo de Tesis, las cuales principalmente pretenden ser, en esta fase, el fundamento sobre el que se asiente y guíe una posterior y más amplia investigación en igual sentido, al objeto de tratar de completar la amplia normativa ya existente sobre las Puzolanas, la cual y como es sabido, adolece del defecto del esclarecimiento del CARACTER de cada una de ellas, es decir, de su más que probable comportamiento en un medio agresivo, ó no, dado, y con él de su grado de utilidad para un fin concreto, así como también del MAXIMO aprovechamiento o participación de aquellas para la mejor consecución del mismo.

Tal cúmulo de Aplicaciones Tecnológicas se pueden agrupar en grupos claramente diferenciados:

### 1º Grupo.-

Son todas aquellas Aplicaciones destinadas a calificar y cualificar a un Cemento P, PY, PA, PUZ (ambos, PA y PUZ, constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s)), y/o Puzolana cualquiera para un fin dado, mediante los métodos acelerados de ensayo.

Le Chatelier-Anstett: Parámetro empleado,  $\Delta\phi_{xd}$  (%), y/o  
ASTM C 452: Parámetros empleados,  $\bar{J}_{xd}$ , y/o  $RMF_{xd}$ , y/o  $RMC_{xd}$ , y/o  
HIBRIDO-1: Parámetros empleados,  $\Delta\bar{L}_{xd}$ , y/o  $RMF_{xd}$ , y/o  $RMC_{xd}$ .

Las mismas comprenden desde la 1ª a la 8ª Aplicación, inclusive.

### 2º Grupo.-

Es aquella Aplicación destinada a calificar a un Cemento P, PY, PA o PUZ (ambos, PA y PUZ, constituidos únicamente por Portland y Puzolana(s)) como de elevada o moderada resistencia al ataque de los iones sulfato, mediante el parámetro titulado LIMITE DE RESISTENCIA SULFATICA, LRS, expresado en meses (o fracción de ellos).

La misma comprende la Aplicación 9ª en exclusiva.

### 3º Grupo.-

Es aquella Aplicación destinada a determinar LA DOSIFICACION MAS APROPIADA QUE DEBERA TENER UN CEMENTO DE MEZCLA, constituido únicamente por Cemento Portland (ó Clinker Portland en su caso), Puzolana (s) y Yeso, para cada caso concreto, y del cual se disponen previamente de cada uno de sus componentes por separado.

La misma comprende la Aplicación 10ª en exclusiva.

#### 4º Grupo.-

Son aquellas Aplicaciones destinadas a fijar las condiciones generales que deberá reunir la fabricación y utilización de hormigones preparados con cementos de mezcla PA o PUZ, constituidos únicamente por fracción portland y Puzolana(s),

- o eminentemente "silícicas", caso de la D y N de este trabajo y similares,
- ó eminentemente "alumínicas", caso de la M de este trabajo y similares respectivamente, (o similares) al objeto de alcanzar y asegurar, en caso caso, la máxima participación de las mismas para su fin respectivo, RS o RM elevadas a edades iniciales.

Las mismas comprenden las Aplicaciones 11ª y 12ª, Únicamente.

#### 5º Grupo.-

Son aquellas Aplicaciones destinadas a llenar de contenido y precisar las palabras terminales "... y similares", con las que en multitud de ocasiones a lo largo de la presente memoria se finalizan aquellas frases referidas concretamente a las puzolanas eminentemente silícicas, D y N, y/o alumínicas, M, de este trabajo, y a aquellos otros materiales bien naturales o artificiales que por su semejanza correspondiente en constitución físico-química con las mismas y pese a no haber sido ensayados expresamente en este trabajo, pueden tener un similar comportamiento puzolánico al de aquéllas, respectivamente.

Las mismas comprenden las Aplicaciones 13ª y 14ª, Únicamente.

Seguidamente se pasa a realizar la exposición detallada de cada una de ellas:

#### 1ª Aplicación

CALIFICACION Y CUALIFICACION DE UN CEMENTO PORTLAND COMO DE "ELEVADA O MODERADA RESISTENCIA, SEGUN EL CASO, AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO", MEDIANTE EL METODO ACELERADO DE ENSAYO DE Le Chatelier-Anstett.

Para tratar de juzgar, calificar y cualificar a un Cemento Portland como de elevada o moderada, según el caso, resistencia al ataque de los iones sulfato, se ensayará el mismo según especifica expresamente la parte operativa del método acelerado de ensayo de Le Chatelier-Anstett (199), y si el  $\Delta \theta$  (%) a la edad de 28 días de su torta correspondiente,



- no sobrepasa el valor de 1,25% del diámetro inicial,  $\phi_0$ , de la misma, se podrá calificar de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato", no obstante y tan sólo en el caso de máxima duda, se podría prolongar excepcionalmente el ensayo hasta la edad de 90 días como máximo; dicho valor del 1,25% a la edad del ensayo de 28 días, se deberá considerar por tanto, según el autor de este trabajo, como el único y fundamental criterio, exigible en su momento si procede, para poder calificar a un Cemento Portland como de "elevada resistencia" al mencionado ataque agresivo, ó
- sobrepasa apreciablemente el valor de 1,25% y no sobrepasa el valor de 4,00%, ambos del diámetro inicial,  $\phi_0$ , de la misma, se podrá calificar de "moderada resistencia al ataque de los iones sulfato"; dicho valor del 4,00% a la edad del ensayo de 28 días, se deberá considerar, por tanto, según el autor de este trabajo, como el único y fundamental criterio, exigible en su momento si procede, para poder calificar en su caso como de "moderada resistencia" al mencionado ataque agresivo a un Cemento Portland.

## 2\* Aplicación

CONDICIONES GENERALES PARA LA CALIFICACION Y CUALIFICACION DE UN CEMENTO DE MEZCLA PA O PUZ (CONSTITUIDO UNICAMENTE POR CEMENTO PORTLAND Y PUZOLANA(S)) Y/O DEL CARACTER DE UNA(S) PUZOLANA(S) DADA(S), QUE FORMA (N), O NO, PARTE INTEGRAL DE AQUEL(LS), MEDIANTE EL PARAMETRO  $\Delta Z_{28d}$  DEL METODO ACCELERADO DE ENSAYO DE Le Chatelier-Anstett.

2\*.1º.- Para tratar de calificar y juzgar a tal(es) cemento(s) de mezcla PA ó PUZ, como de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato, en general y de calcio (yeso), en particular", se ensayará el mismo (siempre que cumpla con su normativa vigente y en especial con la superficie específica o grado de finura de molido) tal y como especifica expresamente la parte operatoria previa del método acelerado de ensayo de Le Chatelier-Anstett, y el valor del  $\Delta Z$  (%) de su torta correspondiente, a la edad de 28 días, no deberá sobrepasar el 1,25% del diámetro inicial,  $\phi_0$ , de la misma. En caso contrario el cemento de mezcla en cuestión habrá de ser calificado como de "no elevada resistencia" al mencionado ataque agresivo.

Adicionalmente y como propuesta, en este último caso, al cemento de mezcla correspondiente se le podría calificar como de "moderada resistencia al ataque de los iones sulfato, en general, y de calcio (yeso), en particular", si el  $\Delta Z$  (%) de su torta correspondiente, a la edad de 28 días, no sobrepasa el valor del 4,00%.

Ambos valores, 1,25% y 4,00%, se deberán considerar por tanto, según el autor de este trabajo, como el único y fundamental criterio, exigible en su momento si procede, para poder calificar de elevado o moderado, respectivamente, el grado de RS de un Cemento de mezcla constituido únicamente por Portland y Puzolana(s).

2\*.2\*.- Para tratar de determinar el CARACTER ("silíceo" ó "aluminico" ó "sílico-aluminoso"...¿ ó férrico ?....etc.,) de una (ó varias) Puzolana(s) dada(s), y en su caso:

- (A) El tipo y grado de susceptibilidad al ataque de los iones sulfato de aquella(s),
- (B) La clasificación resultante de varias Puzolanas dadas en función del mismo, o estudio comparativo de varias Puzolanas mediante el valor del  $\Delta \emptyset_{1d}$  y/o  $\Delta \emptyset_{28d}$ , (ó contenido relativo de  $Al_2O_3^P$  de cada una respecto de las demás), y/o
- (C) La cualificación ó adecuación de la(s) Puzolana(s) ensayada(s), para un fin dado,

se le determinará(n) previamente,

- su composición química (ó contenido de óxidos ácidos fundamentales:  $SiO_2(\%)$ ,  $Al_2O_3(\%)$  y  $Fe_2O_3(\%)$ ,

- su grado de finura de molido, el cual habrá de ser tal, que deje una cantidad máxima de retenido del  $20\% \pm 1\%$  sobre el tamiz de  $45 \mu$  mm de luz de malla; no obstante aquellas puzolanas que por su tamaño y forma de partícula aconsejen utilizarse tal cuales, tales como diatomeas, cenizas volantes esferoidales, metacaolines, etc., se ensayarán

. tal cuales, únicamente, si cumplen con holgura el condicionante anterior, notificándose expresamente, y

. adicionalmente, si no lo cumplen y hay que molturarlas para cumplirlo,

determinando en ambos casos, ó sólo el primero, si fuera necesario el tamaño y frecuencia de partícula mediante métodos mas precisos tales como el método COULTER, BACO, etc.,

- su comportamiento en el ensayo de Fratini y cualquier otro(s) ensayo(s) de resistencias mecánicas características de un(os) determinado(s) mortero(s) normalizado(s) existente(s) al efecto, si así adicionalmente se deseara, de los cementos de mezcla PA, 80/20 y PUZ, 70/30 y 60/40, en peso Cemento Portland P y PY respectivamente (de Puzolana X los que mas adelante se darán sus características), o similares, preparados adecuadamente en el laboratorio (tiempo común de mezclado y homogeneización mediante túrbula de 35 r.p.m., de 30 minutos, para cada cemento de mezcla), con la misma y un cemento portland P y/o PY, según los casos,

para a continuación aplicar el método acelerado de ensayo de Le Chatelier-Anstett en el orden que se expone en la siguiente

PORTE OPERATORIA XII.2.2º

1º.- A dos cementos portland, uno P y otro PY, respectivamente, sólo a sus clínteres correspondientes), los cuales tendrán que poseer las siguientes características:

- Respecto del contenido de  $C_3A$ :
  - . el cemento portland P, tendrá un contenido de  $C_3A$  comprendido entre el 10,0% y el 15,0%, y
  - . el cemento portland PY, tendrá un contenido  $C_3A$  escaso ó nulo
- Respecto del contenido de  $C_3S$  y  $C_2S$ :
  - . el cemento portland P deberá tener un contenido elevado de  $C_3S$  (70% a 80%) y al contrario de  $C_2S$ ,
  - . el cemento portland PY deberá tener un contenido,
    - elevado de  $C_3S$  (70% a 80%) y al contrario de  $C_2S$ , si la Puzolana Problema parece ser presumiblemente Aluminica ó Alúmino-Silícica ó Silico-Aluminica, y
    - elevado de  $C_2S$  y al contrario de  $C_3S$  si la Puzolana Problema parece ser presumiblemente Silícica.
- Respecto del contenido de álcalis, expresado como  $Na_2O(\%) + K_2O(\%)$ :

Ambos cementos portland, P y PY, deberán tener un contenido bajo ó escaso, siendo, no obstante, el ideal de nulo contenido.
- Respecto de la finura de molido o superficie específica:

Ambos cementos portland, P y PY, tendrán que poseer una elevada superficial específica, de  $4200 \pm 50 \text{ cm}^2/g$  confirmando expresamente que la misma en cada caso no deje residuo alguno sobre el tamiz de  $80 \mu\text{m}$  de luz de malla.

2º.- A todos y cada uno de los cementos de mezcla PA y PUZ 80/20, 70/30 y 60/40 u otros similares, cemento P/Puzolana Problema H y Cemento PY/Puzolana Problema H, preparados al efecto, habiéndose de utilizar las siguientes

BASES PARA EL DIAGNOSTICO XII. 2º.2º (para el objetivo 2º de la 2ª Aplicación)

Para la determinación del CARACTER (silícico ó aluminico ó sílico-alumino....¿ó férrico?...etc.,) de una Puzolana dada se tendrá en cuenta que:

- 1º.- Para que una Puzolana cualquiera H así ensayada se pueda considerar como eminentemente "silícica", (con las consecuencias tecnológicas pertinentes de aumento de la RS que le comunica al cemento portland P ó PY con el que se coaligue,) habrá de cumplir los siguientes requisitos:

- 1.-  $\text{SiO}_2(\%) + \text{Al}_2\text{O}_3(\%) + \text{Fe}_2\text{O}_3(\%) \geq 70,0\%$
- 2.-  $\text{SiO}_2(\%) \geq 60,0\%$
- 3.-  $(\text{SiO}_2(\%)/\text{Al}_2\text{O}_3(\%)) \geq 6,0$
- 4.- Ensayo de Frattini: Habrá de satisfacerse, (advirtiéndose de la posibilidad de que,
  - . el mismo se cumplimente justamente a la edad de 28 días, y no a la de 7, y que
  - . la cantidad de líquido residual necesario para llevar a cabo las determinaciones volumétricas correspondientes suele,
    - ser menor que la de cualquier cemento puzolánico tradicional, y
    - disminuir con la adición de Puzolana Problema H de un cemento de mezcla al siguiente, conforme aumenta su contenido de puzolana.)
- 5.- En su caso, el (los) Ensayo(s) Normalizado(s) de Resistencias Mecánicas Características, RMF y RMC, de un determinado mortero, deberán satisfacerse igualmente, al menos a la edad de 28 días, aunque no obstante y en este caso se puede prolongar la(s) edad(es) de las mismas a 60, 90, ó 180 días, incluso a mas edad si fuera necesario, advirtiéndose además que por lo general la cantidad de agua de amasado del mortero tradicional suele,
  - ser notablemente escasa, aumentando extraordinariamente las necesidades de la misma con la adición de Puzolana Problema H de un cemento de mezcla al siguiente, y
  - exudar parte de ella durante las primeras horas del curado en C.H., la cual suele quedar sobrenadando encima de la cara vista de la probeta del mortero, de modo que le impide su contacto directo con la atmósfera.
- 6.- Ensayo de L-A: Habrá de satisfacerse del siguiente modo:
  - 6.1.- Circunstancialmente (pero con grandes probabilidades de que pueda ocurrir)

En las distintas fases operatorias que comprende el ensayo de L-A, se podrá observar que,

    - durante el primer amasado con agua desionizada, del (los) cemento(s) de mezcla correspondiente(s), la relación  $\frac{a}{c} = 0,5$  suele ser notoriamente escasa siendo necesario el aumentarla notablemente, hasta alcanzar la plasticidad común de una pasta tradicional, incrementándose dicho aumento con la adición de Puzolana Problema H al cemento de mezcla, de modo y manera que en cualquier caso deberá quedar comprendida entre 0,6 y 1,0, y

- durante la fabricación de la torta correspondiente, la cantidad de agua desionizada suele,
- . aumentar apreciablemente, del 6%-8% al 9%-12%, y
- . aumentar del mismo modo con la adición de Puzolana Problema H al cemento de mezcla.

6.2.- Obligatoriamente

- (a) El valor del  $\Delta C_{28d}^{(H)}$ , a la edad de 28 días,  $\Delta C_{28d}^{(H)}$ , de la torta del cemento portland (matriz acompañante común) PY solo, tendrá que ser,
- obligatoria y notablemente menor del 1,25%, habiéndose de ser éste, y no otro, el único y fundamental criterio exigible para calificar y cualificar a aquél; y en caso de que no cumpliera con esta especificación, habrá de sustituirse por otro que la cumpla.
- (b) Los valores del  $\Delta C_{28d}^{(H)}$  de las tortas de los cementos de mezcla PA y PUE correspondientes 80/20, 70/30 y 60/40, por este orden, preparados al efecto con dicho cemento portland PY elegido anterior y la Puzolana Problema H, tendrán que,
- ser ligeramente menores, en dicho orden, que los correspondientes 80%, 70% y 60%, respectivamente, del  $\Delta C_{28d}^{(H)}$  de la torta del cemento portland matriz constituyente común PY sólo (que son los que corresponderían en el supuesto de que la Puzolana Problema H únicamente actuase como un inerte  $P_3$  y no como tal Puzolana),
  - ser apreciablemente menores en dicho orden, que el correspondiente  $\Delta C_{28d}^{(H)}$  de la torta del propio cemento portland matriz constituyente común PY solo, disminuyendo generalmente con la adición de Puzolana Problema H (véase al efecto la circunstancialidad existente a continuación, pues según la misma en vez de "disminuir" con la adición de Puzolana Problema H podría ser "aumentar" mas o menos ligeramente con la adición de Puzolana Problema H), y
  - disminuir apreciablemente, en dicho orden, con la adición de Puzolana Problema H, aunque circunstancialmente bien pudiera ocurrir en este caso todo lo contrario (manteniéndose de este modo por mucho mas tiempo de 180, 270, 365, etc., días), es decir,

- . aumentar ligeramente con la adición de Puzolana Problema H,
- . ser todos ó solo alguno(s), iguales ó ligeramente mayores que el valor de su porcentaje del  $40_{28d}$  del PY solo, respectivo, y
- . llegar a superar incluso todos ó solo alguno(s),
  - . el valor del  $40_{28d}$  (%) de la torta del propio cemento portland matriz constituyente común PY solo, y
  - . el valor tope máximo del 1,25%, dejando por tanto de ser de elevada RS, aunque en algun(os) caso(s), el 80/20 con menos probabilidades de alcanzario que el 60/40 hermano, ó
- . Únicamente el primero,

en cuyo caso la Puzolana Problema H bien podría tratarse de un moler, ó gaize, ó pseudo-kieselgur, ó similar, que normalmente suelen estar constituidas por múltiples y variadas impurezas más o menos arcillosas, las cuales por su contenido de  $Al_2O_3$ , pueden llegar a originar un comportamiento no acorde con esta base para el diagnóstico, en especial cuando el cemento portland matriz acompañante es un PY; de aquí que en tal caso tanto el AQ de la(s) Puzolana(s) en cuestión, y más concretamente su cociente  $SiO_2$  (%) /  $Al_2O_3$  (%) y contenido de  $SiO_2$  (%), deberán de proporcionar una posible aclaración de la anomalía detectada, la cual suele mantenerse en este caso más allá de las primeras edades de ensayo, y viceversa, en caso contrario, o sea, cuando el cemento portland matriz acompañante es un P. como se verá a continuación.

Asimismo la altura, h, de la torta puede también resultar aumentada en su origen con la adición de Puzolana Problema H al cemento de mezcla manteniéndose de este modo durante todo ó gran parte del ensayo - en teoría, tanto más tiempo cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del cemento de mezcla y viceversa -, en cuyo caso este dato únicamente se tendrá en cuenta para confirmar que dicha Puzolana Problema H puede ser una diatomita, o cualquier otra similar, o no, muy porosa.

(c) El valor del  $40_{28d}$  (%) de la torta del cemento portland

matriz acompañante común P solo tendrá que ser,

- obligatoria y notablemente mayor del 1,25% de su diámetro inicial,  $\phi_o$ , y
- obligatoria y netamente mayor del 4,00% de su diámetro inicial,

habiendo de ser,

- la primera especificación, el único y fundamental criterio exigible, para poder calificarlo (y cualificarlo), de elevada, ó no, RS, y
- la segunda especificación, el único y fundamental criterio exigible en su momento si así se estimare oportuno, para poder calificarlo (y cualificarlo) de escasa RS

y en caso de que el cemento P elegido no cumpliera con ambas ó solo una de las especificaciones citadas, habrá de sustituirse por otro P que las cumpla.

(d) Los valores del  $\Delta\phi_{28d}$  (%) de las tortas de los cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes, 80/20, 70/30 y 60/40, por este orden, preparados al efecto con dicho cemento portland P elegido anterior y la Pozolana Problema H, tendrán que,

- ser netamente menores que los correspondientes 80%, 70% y 60%, respectivamente del  $\Delta\phi_{28d}$  (%) de la torta del cemento portland matriz constituyente común P solo (que son los que le corresponderían en el supuesto de que la Pozolana Problema únicamente actuase como un inerte<sub>RS</sub> y no como tal puzolana),
- ser notablemente menores que el correspondiente  $\Delta\phi_{28d}$  (%) de la torta del propio cemento portland matriz constituyente común P sólo, aumentando tal minoría con la Adición de Pozolana Problema H (véase al efecto la circunstancialidad existente a continuación pues según la misma, en vez de "disminuir" con la adición de Pozolana Problema H, será "aumentar" con la adición de Pozolana Problema H),
- disminuir notablemente con la adición de Pozolana Problema H, pudiendo llegar todos ó sólo alguno(s) -difícilmente la del 80/20, y viceversa la del 60/40 hermanco-

llegar a ser inferiores al tope máximo del 1,25%, aunque circunstancialmente bien pudiera ocurrir en este caso todo lo contrario (manteniéndose de este modo tanto mas edades posteriores a la de 28 días, cuanto mas próximo al 10% es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante común P, y viceversa en cuyo caso empieza a cumplirse la generalidad expresada al principio de este punto), es decir,

- . aumentar ligeramente con la adición de Puzolana Problema H,
- . ser todos ó sólo alguno(s), iguales ó muy escasamente mayores que el valor de su porcentaje del  $\Delta\bar{D}_{28d.}(\%)$  del P sólo, respectivo, y
- . llegar a superar todos ó sólo alguno(s) (tales casos muy difícilmente) el valor del  $\Delta\bar{D}_{28d.}(\%)$  de la torta del cemento portland matriz conformante común P sólo,

no obstante y en cualquier caso, la altura n, de la torta puede resultar aumentada en su origen, manteniéndose de este modo durante todo o gran parte del ensayo, -en teoría tanto mas tiempo, cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del cemento de mezcla y viceversa-, con la adición de Puzolana Problema H, en cuyo caso este dato únicamente se tendrá en cuenta para confirmar que la misma puede ser una diatomita o cualquier otra similar, ó no, muy porosa.

2).- Para que una Puzolana cualquiera Z, así ensayada, se pueda considerar como eminentemente "aluminica", con las consecuencias pertinentes de disminución de la RS que le comunica a los cementos portland, P y PY, con los que se coaligue, habrá de cumplir los siguientes requisitos:

- 1.-  $SiO_2(\%) + Al_2O_3(\%) + Fe_2O_3(\%) \geq 70,0\%$
- 2.-  $00,0\% < SiO_2(\%) < 60,0\%$ , y  $Fe_2O_3(\%)$  escaso
- 3.-  $(SiO_2(\%)/Al_2O_3(\%)) < 6$
- 4.- Ensayo de Fratini: Habrá de satisfacerse, advirtiéndose de la posibilidad de que el mismo se cumplimente sobradamente a la edad de 7 días, mas que a la de 28 días.
- 5.- En su caso, el (los) Ensayo(s) Normalizado(s) de Resistencias Mecánicas Características, RMF y RMC, de un determinado



mortero, deberá(n) satisfacerse sobradamente a las edades de 1, 3, 7 y 28 días, en especial a las primeras de 1, 3 y 7 días, no siendo necesario por lo general el ampliar adicionalmente las edades características por encima de la de 28 días.

6.- Ensayo de L-A: Habrá de satisfacerse del siguiente modo:

Obligatoriamente

(a) Idéntico a igual sub-apartado (a) del apartado anterior

XII 2°. 2°. 1°. 6. 2.

(b) Los valores del  $\Delta\phi_{28d}$  (%) e  $\Delta h$  (%) de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes 80/20, 70/30 y 60/40, por este orden, preparados al efecto con dicho cemento portland PY elegido y la Puzolana Problema Z, tendrán que,

- ser a la edad de 28 días notablemente mayores, en dicho orden, que los correspondientes 30%, 70% y 60%, respectivamente, del  $\Delta\phi_{28d}$  (%) de la torta del cemento portland matriz constituyente común PY sólo, (que son los que corresponderían en el supuesto de que la Puzolana Problema únicamente actuase como un inerte<sub>RS</sub> y no como tal puzolana), aumentando la diferencia entre ambos con la adición de Puzolana Problema Z, y viceversa, y

- ser,

. a la edad de 1 día,  $\Delta\phi_{1d}$  (%) e  $\Delta h_{1d}$  (%), obligatoria y apreciablemente, y

. a la edad de 28 días,  $\Delta\phi_{28d}$  (%) e  $\Delta h_{28d}$  (%), obligatoria y notablemente

mayores, por este orden, que los correspondientes a la torta del cemento portland matriz constituyente común PY solo, aumentando tal mayoría con la adición de Puzolana Problema Z, o al menos, siendo el  $\Delta\phi_{1y28d}$  de la torta del 70/30 mayor que la del 80/20 e incluso que la del 60/40 en ocasiones.

- aumentar notablemente con la adición de Puzolana Problema Z, al menos del 80/20 al 70/30, (manteniéndose de aquél modo, tanto mas tiempo después de la edad de 28 días, cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz conformante común y viceversa), pudiendo llegar a superar todos ó incluso sólo alguno(s) el valor tope máximo del 1,25% dejando por tanto de ser de elevada RS, e incluso el valor tope máximo del 4,00%, dejando por tanto de ser de moderada RS.

(c) Idéntico a igual sub-apartado (c) del apartado anterior, XII 2.2.1.6.2.

(d) Los valores del  $\Delta\phi$  (%) e  $\Delta h$  (%) de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes 80/20, 70/30 y 60/40, por este orden, preparados al efecto con cemento portland P elegido y la Puzolana Problema Z, tendrán que - ser notablemente mayores, en dicho orden, que los correspondientes 80%, 70% y 60%, respectivamente, del  $\Delta\phi_{28d}$  (%) de la torta del cemento portland matriz constituyente común P sólo (que son los que corresponderían en el supuesto de que la Puzolana Problema únicamente actuase como un inerte<sub>RS</sub> y no como tal puzolana), aumentando la diferencia entre ambos con la adición de Puzolana Problema Z, y viceversa.

- ser,

. a la edad de 1 día,  $\Delta\phi_{1d}$  (%) e  $\Delta h_{1d}$  (%), obligatoria y apreciablemente, y

. a la edad de 28 días,  $\Delta\phi_{28d}$  (%) e  $\Delta h_{28d}$  (%), obligatoria y notablemente,

mayores, por este orden, que los correspondientes a la torta del cemento portland matriz constituyente común P solo, aumentando tal mayoría,

. con la adición de Puzolana Problema Z, y viceversa, y

. con respecto a igual caso anterior (E) de cemento portland matriz constituyente PY, dado que en aquél del PY, la posibilidad de existencia de efecto sinérgico es bastante menor que en éste del P.

- aumentar notablemente,

. con la adición de Puzolana Problema Z, y

. con respecto a igual caso anterior (B), por el mismo motivo de antes, el efecto sinérgico,

(manteniéndose de este modo tanto mas tiempo, después de la edad de 28 días cuanto mas próximo al 10% es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz conformante común P, y viceversa), pudiendo llegar a superar el valor tope máximo del 4,00% dejando por tanto de ser de moderada RS.

3<sup>a</sup>.- Para que una Puzolana cualquiera W, así ensayada, se pueda considerar como silíceo-aluminosa ó aluminio-silíceo con las consecuencias tecnológicas correspondientes, habrá de cumplir los siguientes requisitos:

- 1.-  $\text{SiO}_2(\%) + \text{Al}_2\text{O}_3(\%) + \text{Fe}_2\text{O}_3(\%) \geq 70,0\%$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\%)$  escaso
- 2.-  $6,0 > \text{SiO}_2(\%)/\text{Al}_2\text{O}_3(\%)$
- 3.- XII 2 2 2.1.6.1. (B), parte circunstancial única y exclusivamente, en su caso, del apartado correspondiente a una Puzolana "eminente silíceo".
- 4.- XII 2 2 2.2.6 (a)(b)(c) y (d), del apartado correspondiente a una Puzolana "eminente aluminosa".

Todas ellas se encuentran resumidas en la Tabla 89

5.- Para la obtención del tipo y grado de susceptibilidad al ataque de los iones sulfato de una Puzolana dada W, se tendrán en cuenta los valores del  $\Delta Z_{28d}(\%)$  de las tortas correspondientes a sus cementos de mezcla PA y PUZ anteriores de cemento portland matriz constituyente común PY, así como también el de la de este último sólido. Y si los valores - del  $\Delta Z_{28d}(\%)$  de la torta, de aquellos son:

- (a) MAYORES que el 80%, 70% y 60%, respectivamente, del  $\Delta Z_{28d}(\%)$  de la torta cemento portland matriz constituyente común PY solo, y aumentan,
- en valor absoluto (entre sí), y
  - en valor relativo (diferencia con el  $\Delta Z_{28d}(\%)$  del cemento PY sólo anterior)

conforme aumenta la cantidad de Puzolana W de un cemento de mezcla al siguiente, se podrá decir que la misma ES SUSCEPTIBLE DE ATAQUE POR LOS IONES SULFATO, y viceversa, lo cual no implicará necesaria y obligatoriamente que TODOS sus cementos de mezcla PA y/o PUZ, preparados con ese ó cualquier otro cemento portland matriz acompañante P ó PY, sean de elevada ó moderada ó escasa resistencia al mencionado ataque agresivo. No obstante, y en estos dos últimos supuestos, la Puzolana Problema W NO se podrá calificar de ADECUADA ó APROPIADA para que sus cementos de mezclas correspondientes PA y/o PUZ, de matriz P y/o PY, traten de resistir un severo ataque sulfático.

Por otra parte una de las probabilidades concretas de este caso es que pese a ser mayores que los porcentajes citados y aumentar en valor absoluto con la adición de Puzolana Problema los valores del  $\Delta\emptyset_{28d}$  (%) de sus tortas correspondientes, todos ó alguno(s), proporcionen un valor del  $\Delta\emptyset_{28d}$  (%) de su torta respectiva, IGUAL al de la correspondiente a su cemento portland constituyente común PY solo, en cuyo caso

- si los tres son iguales, o sea

$$\Delta\emptyset_{28d}^{PY} = \Delta\emptyset_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 80/20} = \Delta\emptyset_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 70/30} = \Delta\emptyset_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 60/40}$$

ello deberá indicar que la expansividad derivada de la fracción Puzolana Problema R, sustituyente, a tal edad de 28 días, es equivalente a la correspondiente de la fracción PY, sustituida, y

- si sólo lo son una ó dos, o sea

$$\Delta\emptyset_{28d}^{PY} = \Delta\emptyset_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 80/20} = \Delta\emptyset_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 70/30} > \Delta\emptyset_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 60/40}$$

ello deberá indicar que la citada equivalencia anterior sólo se circunscribe a tales casos concretos.

De todo lo cual se ha de deducir que pese al buen resultado aparente obtenido, la Puzolana Problema W ES SUSCEPTIBLE DE ATAQUE POR LOS IONES SULFATO, con todas las posibles implicaciones al caso. De aquí que en tales circunstancias, deba ser obligatorio PROLONGAR por mas tiempo de 28 días el ensayo, al objeto de constatar, ó no, tales igualdades obtenidas citadas, y si éstas continuasen de igual modo, y por causa de una economía manifiestamente deseable, tan sólo al técnico proyectista, le incumbirá, en exclusiva, las responsabilidades, si las hubiere, de la utilización de dicha Puzolana Problema W; aumentando proporcionalmente en tales casos la obligatoriedad y responsabilidad, citadas, en tanto aumente el contenido de  $C_3A$  del cemento portland constituyente común elegido con el que se haya ensayado indebidamente la Puzolana Problema W, y disminuya el cemento portland con el que se vaya a mezclar y utilizar en la obra real, y viceversa.

Asimismo se reconoce igualmente la posibilidad en este caso, de que en el estudio de una(s) Puzolana(s) dada(s) mediante el cemento portland matriz acompañante común adecuado que se aconseja al principio de esta PARTE OPERATORIA, tales encrucijadas anteriores se puedan solapar con el propio margen de error del método de ensayo empleado, y/o del personal que lo ejecute, puesto que todas ellas deberán ocurrir en un entorno de valores, menores del 1,25% a la edad de 28 días, que con los propios límites de confianza de tal especificación propuesta por Jaspers (20), de  $\pm 0,3\%$  quedaría entre 0,75% y 1,75%, haciendo de este modo mas difícil aún el poder discernir claramente sobre la actitud ó el carácter de la(s) Puzolana(s) así ensayada(s).

Del mismo modo, se admite igualmente la posibilidad real de cumplimiento de los condicionantes afines anteriores por parte de ciertas puzolanas que por su constitución físico-química y mas concretamente por su composición química, y de entre ellos el módulo S/A, y el valor de S, pueden estar bastante mas cercanas a una eminentemente silícica que a una eminentemente aluminica, como bien pudiera ocurrir con algún moler gaize, pseudo-kieselgur, ó similar, pero ello no es óico para poder definirlos, si procede, como susceptible(s) de ataque por los iones sulfato, según el condicionante expuesto al principio, aunque la mayoría de sus cementos de mezcla PA y PUZ resultaren ser de elevada o mediana RS y casi ninguno de escasa ó nula RS, en cuyo caso la misma deberá ser más acribable a la fracción cemento portland P acompañante que a la propia puzolana que le acompaña, ó

- (b) IGUALES que el 30%, 70% y 60%, respectivamente, del  $\Delta\phi_{28d}(\%)$  del cemento portland matriz acompañante común PY sólo, y disminuyen en valor absoluto (entre sí) conforme aumenta la cantidad de Puzolana. Problema de un cemento de mezcla al siguiente, se podrá decir, desde el punto de vista de la RS, que la misma ha actuado como un INERTE pudiéndose calificar de ADECUADA ó APROPIADA para mezclarla con dicho cemento portland matriz PY ó cualquier otro, similar ó no, al objeto de preparar cemento(s) de mezcla PA y/o PUZ de mayor RS que el propio cemento portland matriz P sólo, con el que se mezclase, al (los) cual (es) OBLIGATORIAMENTE habrá de confirmársele(s) previamente, antes de su utilización en obra y mediante este método de ensayo de L-A, su moderada ó elevada RS (según el grado de agresividad del medio con el que su hormigón correspondiente vaya a estar en contacto), ó

(c) MENORES que el 30%, 70% y 80%, respectivamente, del  $\Delta\emptyset_{28d}$  (%) del cemento portland matriz acompañante común PY sólo ó al estado puro, y disminuyen

- en valor absoluto (entre sí), y

- en valor relativo (diferencia con el  $\Delta\emptyset_{28d}$  (%) del PY solo anterior),

conforme aumenta la cantidad de Puzolana Problema de un cemento de mezcla al siguiente, se podrá decir que la misma, actúa PROTEGIENDO DEL ATAQUE POR LOS IONES SULFATO al cemento portland matriz PY anterior, que la acompaña, en cuyo caso tal Puzolana Problema, presumiblemente, bien pudiera ser "silícica" y/o "férrica", pudiéndose la calificar de ADECUADA ó APROPIADA para mezclarla con cualquier cemento portland P ó PY, al objeto de preparar cemento(s) de mezcla PA y/o PUZ de mayor RS que el propio cemento portland matriz, P ó PY, sólo, con el que se mezclare, al (los) cual(es), OBLIGATORIAMENTE habrá de confirmársele previamente antes de su utilización en obra y mediante este método de ensayo de L-A su moderada ó elevada RS (según el grado de agresividad del medio con el que su hormigón correspondiente vaya a estar en contacto).

6.- Para obtener la clasificación de varias Puzolanas en función de su grado de susceptibilidad al ataque de los iones sulfato respectivo, se tendrán en cuenta los valores del  $\Delta\emptyset_{28d}$  (%) de sus tortas correspondientes de cemento portland matriz acompañante común PY preferentemente, los cuales a igualdad de cemento de mezcla (mejor 60/40 que 70/30 y que 80/20, de mejor a peor por este orden de preferencia), se ordenarán de menor a mayor valor.

Dicha clasificación deberá ser tanto mas coincidente con la correspondiente obtenida a la edad de 14 ó 7 ó 1 día inclusive, cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante común, y viceversa, en cuyo caso la validez de la misma quedará trasladada a la de la(s) edad(es) mas inicial(es) del ensayo citada(s), pero en el orden contrario, y a la del cemento de mezcla 60/40 mejor que a la del 70/30, en exclusiva. Tal clasificación se realizará siempre a igualdad de cemento de mezcla y ordenándolas de menor a mayor valor de su  $\Delta\emptyset_{28d}$  respectivo, sin poderse deducir sin mas por ello que las situadas en los extremos correspondientes de las mismas tengan que ser necesariamente silícica y aluminica respectivamente.

- 660 -

- 7.- Para poder decir que una Puzolana dada  $W_2$  aumenta o disminuye la RS de un cemento portland, PY, sólo, o mejor que el (los) - cemento(s) de mezcla constituido(s) únicamente por ambos, posee(n) un grado de RS superior o inferior a su cemento portland matriz PY solo, se tendrá que cumplir:

1º.- Que

		(aumenta RS)		
$40_{23d}$	$\frac{PY}{Puzolana W_2}$ (PA ó PUZ)	$\begin{matrix} < \\ > \end{matrix}$	$40_{23d}$	PY
		(disminución RS)		

Y otro tanto se podrá decir de un P pero generalmente será con una puzolana  $W_3 \neq$  a la  $W_2$  anterior.

- 2º.- Iguales condicionantes afines a cada caso, expuestos en la 2ª base para el diagnóstico, apartados (A), (B) y (C), en especial el (A) y (C).

Y todo ello no implicará obligatoria y necesariamente:

- 1º.- Que el mismo, PA ó PUZ,

. pase a ser (aumento de RS), ó

. deje de ser (disminución de RS),

respectivamente, de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato".

- 2º.- Que el (los) correspondiente(s) cemento(s) de mezcla PA y/o PUZ, hermano(s) menor(es) y/o mayor(es) de aquél(los), tenga(n) del mismo modo aunque distinta cuantía, mayor o menor grado de RS que el cemento portland - matriz PY (ó P).

- 3º.- Que tan sólo aquella Puzolana que,

. aumente la RS del cemento portland PY, ó bien la

. disminuya sin dejar de ser de elevada RS el cemento de mezcla PUZ 60/40 resultante,

se podrá decir que es ADECUADA ó APROPIADA, para dicho cemento portland PY, y lógicamente también lo podrá ser, por tanto, para cualquier P, no pudiéndose decir otro tanto en caso contrario, en cuyo supuesto tan sólo es extrapolable la adecuación de la misma a cualquier otro cemento P' de composición química y características físico-químicas muy similares a las del P anterior, habiéndose de confirmar siempre, y antes de su utilización en obra, su adecuación, ó no, "anti-ataque sulfático" correspondiente mediante algun(os) ensayo(s) acelerado(s) adecuado(s) para tal fin.

4<sup>a</sup>.- En cualquier caso la generalidad anterior, no aplicará obligatoria y necesariamente su cumplimiento taxativo en cualquier otro(s) cemento(s) de mezcla PA y/o PUZ, mas o menos próximo(s) al anterior prefijado, de igual ó distinto cemento portland matriz constitutivo.

### 3ª Aplicación

CALIFICACION Y CUALIFICACION DE UN CEMENTO PORTLAND COMO DE "MODERADA RESISTENCIA AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO", MEDIANTE EL METODO ACELERADO DE ENSAYO ASTM C 452.

Para tratar de juzgar, calificar y cualificar un Cemento Portland como de moderada resistencia al ataque de los iones sulfato, se ensayará el mismo siempre que cumpla con la normativa vigente y en especial en lo concerniente a la superficie específica ó finura de molido del mismo-, según especifica expresamente la parte operatoria del método normalizado de ensayo ASTM C 452 en sus dos versiones ASTM C 452-66,  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}, (215)$  y ASTM C 452-75,  $\frac{a}{c} = c = \text{cte.}, (239)$ -, y si el  $\bar{A}L(\%)$  a la edad de 28 días de sus probetas correspondientes sobrepasa apreciablemente el valor del 0,054% y no sobrepasa el valor del 0,073%, en ambos casos, se podrá calificar de "moderada resistencia al ataque de los iones sulfato". Dicho valor del 0,073% cumplimentable por el cemento portland ensayado a través de las dos versiones del método de ensayo en cuestión, se deberá considerar por tanto, según el autor de este trabajo, como el único y fundamental criterio, exigible en su momento si procede, para poder calificar en su caso a un Cemento Portland dado, como de moderada resistencia al mencionado ataque agresivo.

### 4ª Aplicación

CONDICIONES GENERALES PARA LA CALIFICACION Y CUALIFICACION DE UN CEMENTO DE MEZCLA PA O PUZ (CONSTITUIDO UNICAMENTE POR CEMENTO PORTLAND Y PUZOLANA(S)) Y/O DEL CARACTER DE UNA(S) PUZOLANA(S) DADA(S) QUE FORMA(N), O NO, PARTE INTEGRAL DE AQUEL(LOS), MEDIANTE EL PARAMETRO  $\bar{A}L_7$  y/o 28d. DEL METODO ACELERADO DE ENSAYO ASTM C 452.

4<sup>a</sup>.1<sup>a</sup>.- Para tratar de calificar y juzgar a tal(es) cemento(s) de mezcla PA ó PUZ, como de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato", se ensayará el mismo (siempre que cumpla con la normativa vigente y en especial con la superficie específica o grado de finura de molido), según se especifica expresamente en la dos versiones del método



acelerado de ensayo ASTM C 452,  $\frac{a}{c} = c = \text{cte.}$  y  $\frac{a}{c} = d \neq \text{cte.}$ , y el valor del  $\bar{\Delta}L_{28d}(\%)$  de sus probetas correspondientes no deberá sobrepasar el 0,054%. En caso contrario el cemento de mezcla en cuestión habrá de ser calificado de "no elevada resistencia" al mencionado ataque agresivo.

Y del mismo modo, y si así se juzgare oportuno en su momento para los correspondientes a "moderada resistencia" al mencionado ataque agresivo, no deberá sobrepasar el valor del 0,073% a dicha edad de 28 días.

Por otra parte y en el supuesto de realizar un estudio comparativo de cementos de mezcla PA y/o PUZ, se clasificarán todos a igualdad de método para obtener la relación mediante su valor del  $\bar{\Delta}L_{28d}(\%)$  respectivo.

4<sup>a</sup>.2<sup>a</sup>.- Para tratar de determinar el CARACTER (silícico ó aluminico ó silico-aluminoso ó aluminico-silícico... ó férrico ?...etc.) de una (ó varias) Pozolana(s) dada(s), y en su caso:

- (A) El tipo y grado de susceptibilidad al ataque de los iones sulfato de aquella(s), y/o
- (B) La clasificación resultante de varias Pozolanas dadas en función del mismo, o estudio comparativo de varias Pozolanas mediante el valor del  $\bar{\Delta}L_{7d}$  y/o  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (ó contenido relativo de  $Al_2O_3^{r-}$  de cada una respecto de las demás), y/o
- (C) La cualificación ó adecuación de la(s) Pozolana(s) ensayada(s) para un fin dado,

se le determinarán previamente,

- su composición química (ó contenido de óxidos ácidos fundamentales:  $SiO_2(\%)$ ,  $Al_2O_3(\%)$  y  $Fe_2O_3(\%)$ ,

- su grado de finura de molido, habrá de ser tal que deje una cantidad máxima de retenido del 20%  $\pm$  1% en el tamiz de 45  $\mu$  mm de luz de malla; no obstante aquellas pozolanas que por su tamaño y forma de partícula, aconsejen utilizarse en la industria tal cuales, tales como diatomeas, cenizas volantes, metacaolines, etc., se ensayarán,

. conforme las proporcione el suministrador, únicamente si cumplen con holgura el condicionante anterior, notificándose expresamente, y

. adicionalmente, si no lo cumplen, habiéndose de molturarlas previamente para cumplirlo,

determinando en ambos casos, ó sólo el primero, si fuera necesario, el tamaño y frecuencia de partícula mediante técnicas más precisas, tales como el sistema COULTER, BACO, etc., y

- su comportamiento en el ensayo de Fratini y cualquier otro(s) ensayo(s) de resistencias mecánicas características de uno(s) determinado(s) mortero(s) normalizado(s), existente(s) al efecto, si así adicionalmente se deseara, de los cementos de mezcla PA, 80/20 y PUZ, 70/30 y 60/40, en peso, Cemento P y PY respectivamente, (de los <sup>Puzolana H</sup> que mas adelante se dirán sus características), ó similares, preparados adecuadamente en el laboratorio (tiempo común de mezclado y homogeneización mediante turbula, de 35 r.p.m., de 30 minutos, para cada cemento de mezcla), con la misma y un cemento portland P ó PY,

para a continuación aplicar las dos versiones del método acelerado de ensayo ASTM C 452, o sea, la ASTM C 452-68 y la ASTM C 452-75, en el orden que se expone en la siguiente PARTE OPERATORIA, XII.4\*.2\*. Y ello es debido a que actualmente, en la industria de la construcción del cemento y sus afines, se está utilizando con gran profusión las puzolanas de origen artificial, y mas concretamente las Cenizas Volantes, muchas de las cuales suelen tener una marcada forma esférica que en ocasiones, por si sola, actúa como reductor del agua de amasado, lo cual bien podría llegar a originar que la misma en tales casos fuera inclusive menor de 194 ml/400 g. cemento, que es la cantidad prescrita por la versión en vigor del método de ensayo en cuestión, ó sea, ASTM C 452-75, con lo cual nos apartaríamos del espíritu marcado por ésta para la adecuada trabajabilidad del mortero, causa por la cual y para preservarlo se han prescrito ambas versiones a un tiempo para todo tipo de puzolana y/o cemento de mezcla PA y/o PUZ originado(s) por la(s) misma(s).

#### PARTE OPERATORIA, XII.4\*.2\*.

Ambas versiones del método ASTM C 452, ó sea, la ASTM C 452-68 y la ASTM C 452-75, se aplicarán como decimos:

1\*.- A los dos cementos portland, uno P y otro PY, respectivamente, sólo, (ó a su clinker correspondiente), los cuales tendrán que poseer

- Respecto del contenido de  $C_3A$ :

- . el cemento portland P, tendrá un contenido de  $C_3A$  comprendido entre el 5% y el 8%, y
- . el cemento portland PY, tendrá un contenido de  $C_3A$  escaso ó nulo

- Respecto del contenido de  $C_3S$  y  $C_2S$ : Ambos cemento portland deberán tener un contenido muy elevado de  $C_3S$  (del 70% al 80%) y al contrario de  $C_2S$ , siendo, no obstante, el ideal el  $C_3S$  puro, ó  $C_2S$  nulo. En el supuesto posible de realizar este ensayo del  $\bar{A}L$  en paralelo con el correspondiente a RMF y RMC que se expone en la Aplicación siguiente, XII.5.ª a los contenidos de  $C_3S$  y  $C_2S$  les ocurriría todo lo contrario, es decir, mínimo de  $C_3S$  y máximo de  $C_2S$ .
- Respecto del contenido de álcalis, expresados como  $Na_2O$  (%) +  $K_2O$  (%): Ambos cementos portland, P y PY, deberán tener un contenido bajo ó escaso, siendo, no obstante el ideal el de nulo contenido.
- Respecto de la finura de molido o superficie específica: Ambos cementos portland, P y PY, deberán poseer una superficie específica Elaine de  $2600 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{g}$ . o un grado de finura tal que deje un residuo máximo del 15% en el tamiz de  $80 \mu\text{m}$  (4900 mallas/ $\text{cm}^2$ ).

2ª.- A todos y cada uno de los cementos de mezcla PA y PUZ 80/20, 70/30 y 60/40 u otros similares, Cemento P y Cemento PY, Puzolana A y Puzolana B, preparados al efecto, habiéndose de utilizar las siguientes

BASES PARA EL DIAGNÓSTICO XII.4.2ª (para el objetivo 2ª de la 4ª Aplicación)

4ª.2ª.- Para la determinación del CARACTER (silíceo ó aluminico ó sílico-aluminoso... ó férrico?...etc.), de una Puzolana dada B:

1ª.- Para que una Puzolana cualquiera B así ensayada se pueda considerar como eminentemente "silíceo", con las consecuencias tecnológicas pertinentes de aumento de la RS que le comunican al cemento portland, P ó PY, con el que se coagula, habrá de cumplir los siguientes requisitos:

1.- Los mismos sub-apartados XII.2.2ª.1ª, 1, 2, 3, 4 y 5 de las Bases para el Diagnóstico en el caso del método L-A, con las únicas diferencias en los restantes, los cuales quedarían como siguen:

6.- Ensayo ASTM C 452: Habrá de satisfacerse del siguiente modo:

6.1.- Circunstancialmente (pero con grandes posibilidades de que pueda ocurrir)

En las distintas fases operatorias que comprende este ensayo, se podría observar que en la,

- versión ASTM C 452-68,

. durante la fase de la determinación del agua de amasado a escurrimiento constante (flow=constante), ésta suele aumentar extraordinariamente respec-

to de la de un mortero tradicional para alcanzar la plasticidad normalizada del mismo con la cantidad de Pozolana Problema H añadida al cemento de mezcla, de tal manera que dicho aumento suele ser de una a dos unidades de un cemento de mezcla a otro, con lo que al final del proceso, los valores de tales relaciones obtenidos de cada cemento de mezcla con aquella preparado y así ensayado, suelen quedar comprendidos entre 0,6 y 1,0,

. durante la fase del curado en C.H. y durante las primeras dos o tres horas del mismo, se suele producir una exudación de parte de dicha agua de amasado  $\bar{d}$  en todas ellas, la cual suele quedar sobrenadando encima de la capa externa de la probeta del mortero, de modo que le impide su contacto directo con la atmósfera,

mientras que,

- en la versión ASTM C 452-75, no se deberá producir nada de lo anterior, sino todo lo contrario, es decir que la cantidad de agua de amasado especificada por la propia versión del método, de 194 ml por cada 1500 g. de mortero, resultará sumamente escasa para el amasado normalizado del mismo, por lo que en tal caso se deberá prolongar dicho amasado de 1 minuto a 205  $\pm$  10 rpm, a

. 4 minutos para el del cemento de mezcla 80/20,  
. 6 minutos " " " " " " 70/30, y  
. 8 minutos " " " " " " 60/40

respectivamente. Con lo cual se logra paliar algo tal dificultad (falta de plasticidad) para tratar de verificar cuidadosa y pacientemente el enmoldado respectivo.

#### 6.2.- Obligatoriamente

Que sea cual fuere la versión del método de ensayo ASTM C 452, y a igualdad de versión del mismo:

- (a) El valor del  $\bar{\Delta}L(\%)$  de las probetas del cemento portland matriz acompañante común PY sólo,  
- a la edad de 14 días,  $\bar{\Delta}L_{14d}(\%)$ , tendrá que ser obligatoriamente menor del 0,040%, habiendo de ser éste, y no otro, el único y fundamental criterio exigible

para calificar y cualificar a acuél,

- a la edad de 28 días,  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%), tendrá que ser apreciablemente menor del 0.054%, debiéndose considerar este valor como adicional, secundario y no supletorio, en caso alguno de cemento portland, del anteriormente expresado.

Y en caso de que no cumplierse con ambas especificaciones, a la edad de 14 y 28 días, habrá de sustituirse por otro que las cumpla.

- (b) Los valores del  $\bar{\Delta}L_{7d}$  y/o  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) de las probetas de los cementos de mezcla PA y FUZ correspondientes 80/20, 70/30 y 60/40, por este orden, preparados al efecto con dicho cemento portland PY elegido anterior y la Pozzolana Problema H, deberán de,

- ser ligeramente menores, en dicho orden, que los correspondientes 80%, 70% y 60%, respectivamente, del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) de las probetas del cemento portland matriz constituyente común PY sólo (que son los que corresponderían en el supuesto de que la Pozzolana Problema Únicamente actuase como un  $INERTE_{28}$  y no como tal Pozzolana),
- ser apreciablemente menores que el correspondiente  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) de las probetas del propio cemento portland matriz constituyente común PY sólo, disminuyendo generalmente con la adición de Pozzolana Problema H (véase al efecto la circunstancialidad existente a continuación, pues según la misma, en vez de "disminuir" con la adición de Pozzolana Problema H, podría ser "aumentar" mas o menos ligeramente con la adición de Pozzolana Problema H), y
- disminuir apreciablemente con la adición de Pozzolana Problema H, aunque circunstancialmente bien pudiera ocurrir en este caso todo lo contrario, (manteniéndose de este modo, incluso hasta la edad de 720 días), es decir,
  - . aumentar ligeramente con la adición de Pozzolana Problema H,
  - . ser todo ó sólo alguno(s), igual(es) o ligeramente mayor(es) que el valor de su porcentaje del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) del PY sólo, respectivo, y

- . llegar a superar incluso todos ó sólo algunos),
- , el valor del  $\bar{A}L_{28d}$  (%) de las probetas del propio cemento portland matriz conformante común PY sólo, y
- , el valor tope máximo del 0,054% (propuesto como especificación a la luz de este trabajo, únicamente para los cementos de mezcla PA y PUZ de elevada RS, y adoptable en su momento si procede), dejando por tanto de ser de elevada, RS, aunque en algun(os) caso(s), el 80/20 con menos probabilidades de alcanzarlo que el 60/40 hermano, ó
- , únicamente el primero,

en cuyo caso la Puzolana Problema H bien podría tratarse de un moler, ó gaize, ó pseudo-kieselgur, ó similar.

- (c) El valor del  $\bar{A}L$ (%) de las probetas del cemento portland matriz acompañante común P sólo,
- a la edad de 14 días, tendrá que ser obligatoriamente mayor del 0,040%, habiendo éste de ser, y no otro, el único y fundamental criterio exigible para calificar y cualificar a aquél,
  - a la edad de 28 días, tendrá que ser obligatoria y
    - . notablemente mayor del 0,054%, y
    - . ligeramente menor ó igual del 0,073.(siendo el ideal la máxima proximidad posible a este último, y la máxima lejanía posible de aquél).

Y en caso de que el cemento P elegido no cumpliera con ambas ó sólo una de las especificaciones citadas y en especial con estas dos últimas, a 28 días, habrá de sustituirse por otro P que las cumpla, en especial estas dos últimas citadas.

- (d) Los valores del  $\bar{A}L_{28d}$  (%) de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes 80/20, 70/30 y 60/40, por este orden, preparados al efecto con dicho cemento portland P elegido anterior y la Puzolana Problema H, tendrán que
- ser apreciablemente menores que los correspondientes 80%, 70% y 60%, respectivamente, del  $\bar{A}L_{28d}$  (%) de las probetas del cemento portland matriz constituyente común P sólo (que son los que corresponderían en

el supuesto de que la Puzolana Problema H Únicamente actuase como un INERTE<sub>PS</sub> y no como tal Puzolana),

- ser netamente menores que el correspondiente  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) de las probetas del propio cemento portland matriz constituyente común P sólo, aumentando tal minoría con la adición de Puzolana Problema H (véase al efecto la circunstancialidad existente a continuación, pues según la misma, en vez de "disminuir" con la adición de Puzolana Problema H, será "aumentar" ligeramente con la adición de Puzolana Problema H!),
- disminuir notablemente con la adición de Puzolana Problema H, pudiendo llegar a superar, por debajo, todos ó sólo algunos), -difícilmente las del 80/20 y viceversa las del 60/40 hermano-, el valor tope máximo del 0,054% (propuesto como especificación a la luz de este trabajo únicamente para los cementos de mezcla PA y PUZ de "elevada RS"), aunque circunstancialmente bien pudiera ocurrir en este caso todo lo contrario (manteniéndose de este modo tanto mas edades posteriores a la de 28 días, cuanto mas próximo al 5% es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante común P, y viceversa, en cuyo caso empieza a cumplirse la generalidad expresada al principio de este punto), es decir,
  - . aumentar ligeramente con la adición de Puzolana Problema H,
  - . ser todos ó sólo alguno(s), iguales ó ligeramente mayores que el valor de su porcentaje del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) del P sólo, respectivo, y
  - . llegar a superar todos ó solo alguno(s) (tales casos muy difícilmente) el valor del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) de las probetas del cemento portland matriz conformante común P sólo.

24.- Para que una Puzolana cualquiera Z, así ensayada, se pueda considerar como eminentemente "aluminica", con las consecuencias pertinentes de aumento de la RS que le comunica a los cementos portland P y PY, con los que se coaligue, habrá de satisfacer los siguientes requisitos:

Los mismos sub- apartados XII.2.2.1, 2, 3, 4 y 5 de las Bases para el Diagnóstico en el caso del método L-A, con las únicas diferencias en los restantes, las cuales quedarían como sigue:

6.- Ensayo ASTM C 452: Habrá de satisfacerse del siguiente modo:

6.1.- Obligatoriamente

Que sea cual fuere la versión del método de ensayo ASTM C 452, y a igualdad de versión del mismo:

(a) Idéntico a igual sub- apartado (a) del apartado anterior, XII.4.2.1.6.2.

(b) Los valores del  $\bar{\Delta}L_{28d}(\%)$  de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes 80/20, 70/30 y 60/40, por este orden, preparados al efecto con dicho cemento portland PY elegido y la Puzolana Problema Z, tendrán que:

- ser obligatoria y netamente mayores, por este orden, que

. los correspondientes 80%, 70% y 60%, respectivamente, del  $\bar{\Delta}L_{28d}(\%)$  de las probetas del cemento portland matriz constituyente común PY sólo (que son los que corresponderían en el supuesto de que la Puzolana Problema Z, únicamente actuase como un INERTES y no como tal Puzolana), aumentando la diferencia entre ambos con la adición de Puzolana Problema Z, y viceversa, y que

. el correspondiente  $\bar{\Delta}L_{28d}(\%)$  de las probetas del propio cemento portland matriz constituyente común PY sólo, aumentando tal mayoría con la adición de Puzolana Problema Z y viceversa,

- aumentar notablemente con la adición de Puzolana Problema Z, y

- superar apreciablemente el valor del tope máximo del 0,054%, e incluso quizás el del 0,73%, a tal edad, (véase apartado anterior 4.2.1.6.2. (b)), aunque en algun(os) caso(s), el 80/20 con menos probabilidades de alcanzarlo que el 60/40 hermano.

(c) Idéntico a igual sub- apartado (c) del apartado anterior, XII.4.2.1.6.2.

(d) Los valores del  $\bar{\Delta}L_{28d}(\%)$  de las probetas de los cementos de mezcla PA y PUZ correspondientes 80/20, 70/30 y 60/40,



por este orden, preparados al efecto con dicho cemento portland P elegido anterior y la Puzolana Problema Z, tendrán que,

- ser obligatoria y netamente mayores, por este orden, que
  - . los correspondientes 80%, 70% y 60%, respectivamente, del  $\bar{A}L_{28d}$  (b) de las probetas del cemento portland matriz constituyente común P sólo (que son los que corresponderían en el supuesto de que la Puzolana Problema Z, únicamente actuase como un INERTE<sub>RS</sub> y no como tal Puzolana), y a 1,7614 días mejor que a 28 días
  - . el correspondiente  $\bar{A}L_{28d}$  (b) de las probetas del propio cemento portland matriz constituyente común P sólo, aumentando tal mayoría 1,7614 días mejor que 28, con la adición de Puzolana Problema Z, y
  - , por lo general mas que en igual caso correspondiente al cemento portland PY, visto anteriormente en el sub-apartado (b), (dado que con el P puede originarse un mayor efecto sinérgico que con el PY).
- aumentar notablemente con la adición de Puzolana Problema Z debiendo ser tal aumento netamente superior a igual caso con el cemento portland PY (por idéntica causa anterior, el efecto sinérgico).
- superar apreciablemente el valor tope máximo del 0,073% a tal edad, aunque en algun(os) caso(s), el 80/20 con menos probabilidades de alcanzarlo que el 80/40 hermano.

3.- Para que una Puzolana cualquiera W, así ensayada, se pueda considerar como sílico-aluminosa, ó alúmino-silícica, con las consecuencias tecnológicas correspondientes, se habrán de cumplir las condiciones siguientes:

$$1.- SiO_2(\%) + Al_2O_3(\%) + Fe_2O_3(\%) \geq 70,0\%$$

$$2.- \frac{SiO_2(\%)}{Al_2O_3(\%)} \geq 3,18$$

3.-XII.4.2.1.6.2.(b), parte circunstancial única y exclusivamente, en su caso, del apartado correspondiente a una Puzolana "eminente silícica", y

XII.4.2.2.6 (b) y (d), del apartado correspondiente a una Puzolana "eminente alúminica",

ambos iguales en fundamento, aunque no en cuantía: Disminuir la RS del cemento portland matriz constituyente común PY sólo, con la adición de Puzolana Problema sílico-aluminosa W, y

XI.2.1.3.2.(b), menos parte circunstancial y XI.2.1.3.2.(c) ambos del apartado correspondiente a una Puzolana eminentemente "silícica", e iguales en fundamento, aunque no en cuantía: Aumentar la RS del cemento portland matriz P común sólo, de elevado contenido de  $C_3A$  (del 10% al 15%), con la adición de Puzolana Problema sílico-aluminosa ó aluminosilícica W.

Todas ellas se encuentran resumidas en la Tabla 89.

4.- Para la obtención del tipo y grado de susceptibilidad al ataque de los iones sulfato de una Puzolana dada W, se tendrán en cuenta los valores del  $\bar{A}L_{28d}$  (%) de las probetas correspondientes a sus cementos de mezcla PA y PUZ anteriores, de cemento portland matriz constituyente común PY sólo, así como también el de las de éste último sólo o al estado puro. Y si los valores del  $\bar{A}L_{28d}$  (%) de las tortas de aquellos son:

- (a) MAYORES que el 20%, 70% y 60%, respectivamente del  $\bar{A}L_{28d}$  (%) de las probetas de su cemento portland matriz constituyente común PY, sólo y aumentan,
- en valor absoluto (entre sí), y
  - en valor relativo (diferencia con el  $\bar{A}L_{28d}$  (%) del cemento PY solo anterior),

conforme aumenta la cantidad de Puzolana W de un cemento de mezcla al siguiente, se podrá decir que la misma, ES SUSCEPTIBLE DE ATAQUE POR LOS IONES SULFATO, y vivversa, lo cual no implicará necesaria y obligatoriamente que TODOS sus cementos de mezcla PA y/o PUZ, preparados con ese o cualquier otro cemento portland matriz acompañante P ó PY, sean de elevada ó moderada ó escasa resistencia al mencionado ataque agresivo. No obstante en estos dos últimos supuestos, la Puzolana Problema W NO se podrá calificar de ADECUADA ó APROPIADA para que sus cementos de mezcla correspondientes PA y/o PUZ de matriz P y/o PY, traten de resistir un severo ataque sulfático.

Y la clasificación resultante del estudio comparativo de varias Puzolanas, se obtendrá, a igualdad de cemento de mezcla PA ó PUZ (preferentemente PUZ), en función del valor del  $\bar{A}L_{28d}$  (%) anterior respectivo, de menor a mayor por este orden, la cual deberá indicarnos única-

mente que la Puzolana Problema situada en el extremo del menor valor , será la mas próxima de todas a una referencial silícea (ó férrica, en su caso), no deduciéndose sin mas, por ello que obligatoriamente tenga que serlo, o similar. Por el contrario aquella otra Puzolana Problema, situada al extremo opuesto - del anterior (mayor valor), será la más próxima de todas a una referencial aluminica, no deduciéndose, sin mas, por ello, que obligatoriamente tenga que serlo, ó similar. Por otra parte una de las probabilidades concretas de este caso, es que pese a ser mayores que los porcentajes citados y aumentar en valor absoluto con la adición de Puzolana Problema W, los valores del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) de sus probetas correspondientes, todos o sólo alguno(s), proporcione(n) un valor del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) de sus probetas respectivas IGUAL al de la correspondiente a su cemento portland constituyente común PY solo ó al estado puro, en cuyo caso,

- si los tres son iguales, o sea

$$\bar{\Delta}L_{28d}^{PY} = \bar{\Delta}L_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 80/20} = \bar{\Delta}L_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 70/30} = \bar{\Delta}L_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 60/40}.$$

ello indicará que la expansividad derivada de la fracción Puzolana Problema W sustituyente, a tal edad de 28 días, es equivalente a la correspondiente de la fracción PY sustituida, y

- si sólo lo son uno ó dos, o sea

$$\bar{\Delta}L_{28d}^{PY} = \bar{\Delta}L_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 80/20} = \bar{\Delta}L_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 70/30} > \bar{\Delta}L_{28d}^{PY/Puzolana\ W\ 60/40}$$

ello deberá indicar que la citada equivalencia anterior sólo se circunscribe a tales casos concretos.

De todo lo cual se ha de deducir que pese al buen resultado aparente obtenido, la Puzolana Problema W ES SUSCEPTIBLE DE ATAQUE POR LOS IONES SULFATO, con todas las posibles implicaciones al caso. De aquí que en tales circunstancias deba ser obligatorio PROLONGAR por mas tiempo de 28 días el ensayo, al objeto de constatar, ó no, tales igualdades obtenidas citadas, y si éstas continuasen de igual modo y por causa de una economía manifiestamente deseable, tan sólo al técnico proyectista le incumbirá, en exclusiva, las responsabilidades, si las hubiere, de la utilización de dicha Puzolana

Problema W; aumentando proporcionalmente en tales casos la obligatoriedad y responsabilidad citadas en tanto aumente el contenido de  $C_3A$  del cemento portland constituyente común elegido con el que se haya ensayado indebidamente la Puzolana Problema W, y disminuya el del cemento portland con el que se vaya a mezclar y utilizar en la obra real, y viceversa.

Asimismo se reconoce igualmente la posibilidad en este caso, de que en el estudio de una(s) Puzolana(s) dada(s) mediante el cemento portland matriz acompañante común adecuado que se aconseja al principio de esta PARTE OPERATORIA, tales encrucijadas anteriores se puedan solapar con el propio margen de error del método de ensayo empleado y/o del personal que lo ejecute, puesto que todas ellas deberán ocurrir en un entorno de valores, menores del 0,54% a la edad de 28 días, que con los propios límites de confianza del método en cuestión de  $\pm 0,004\%$ , quedaría entre 0,50% y 0,58%, haciendo de este modo mas difícil aún el poder discernir claramente sobre la actitud ó el carácter de la(s) Puzolana(s) así ensayadas.

Del mismo modo, se admite igualmente la posibilidad real de cumplimiento de los condicionantes afines anteriores por parte de ciertas puzolanas que por su constitución físico-química y mas concretamente por su composición química y de entre ellas el módulo S/A y el valor de S, pueden estar bastante mas cercanos a una eminentemente silfíca que a una eminentemente aluminica, como bien pudiera ocurrir con algún moler, gaize, pseudo-kieselgur, ó similar, pero ello no es óbice para poder definir las si procede, como susceptible(s) de ataque por los iones sulfato, según el condicionante expuesto al principio, aunque la mayoría de sus cementos de mezcla PA y PUZ resultaren ser de elevada o mediana RS, y casi ninguno de escasa ó nula RS, en cuyo caso la misma deberá ser mas achacable a la fracción cemento portland P acompañante que a la propia puzolana que le acompaña, ó

- (b) IGUALES que el 80%, 70% y 60%, respectivamente, del  $\bar{A}L_{28d}(\%)$  del cemento portland matriz acompañante común PY



solo , y disminuyen en valor absoluto (entre sí) conforme aumenta la cantidad de Puzolana Problema de un cemento de mezcla al siguiente, se podrá decir, desde el punto de vista de la RS, que la misma ha actuado como un INERTE<sub>RS</sub> pudiéndosela calificar de ADECUADA ó APROPIADA para mezclarla con dicho cemento portland matriz PY ó cualquier otro, similar ó no, al objeto de preparar cemento(s) de mezcla PA y/o PUZ de mayor RS que el propio cemento portland matriz P sólo, con el que se mezclase, al (los) cual(es) OBLIGATORIAMENTE habrá de confirmársela(s) previamente, antes de su utilización en obra y mediante este método de ensayo, su moderada ó elevada RS (según el grado de agresividad del medio con el que su hormigón correspondiente vaya a estar en contacto) ó

- (c) MENORES que el 50%, 70% y 80%, respectivamente, del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) del cemento portland matriz acompañante común PY sólo, y disminuyen

- en valor absoluto (entre sí), y
- en valor relativo (diferencia con el  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) del PY solo anterior)

conforme aumenta la cantidad de Puzolana Problema de un cemento de mezcla al siguiente, se podrá decir que la misma, actúa PROTEGIENDO DEL ATAQUE POR LOS IONES SULFATO al cemento portland matriz PY anterior, que la acompaña, en cuyo caso tal Puzolana Problema, presumiblemente, bien pudiera ser "silícica y/o férrica", pudiéndosela calificar de ADECUADA ó APROPIADA para mezclarla con cualquier cemento portland P ó PY, al objeto de preparar cemento(s) de mezcla PA y/o PUZ de mayor RS que el propio cemento portland matriz, P ó PY, sólo, con el que se mezclase, al (los) cual(es), OBLIGATORIAMENTE habrá de confirmársela(s) previamente antes de su utilización en obra y mediante este método de ensayo de L-A, su moderada ó elevada RS (según el grado de agresividad del medio con el que su hormigón correspondiente vaya a estar en contacto).

- 5.- Para obtener la clasificación de varias Puzolanas en función de su grado de susceptibilidad al ataque de los iones sulfato

respectivo, se tendrán en cuenta los valores del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  (%) de sus probetas correspondientes de cemento portland matriz acompañante común PY preferentemente, los cuales a igualdad

- de versión del método de ensayo ASTM C 452, y
- de cemento de mezcla (mejor 60/40 que 70/30 y que 80/20, de mejor a peor, por este orden de preferencia),

se ordenarán de menor a mayor valor.

Dicha clasificación deberá ser tanto mas coincidente con la correspondiente obtenida a la edad de 14 ó 7 días inclusive cuanto menor es el contenido de  $C_3A$  del cemento portland matriz acompañante común, y viceversa, en cuyo caso la validez de la misma quedará trasladada a la de la(s) edad(es) mas inicial(es) del ensayo citada(s), pero en el orden contrario, y a la del cemento de mezcla 60/40 que la del 70/30, en exclusiva.

Por otra parte dicha clasificación indicará únicamente:

- 1º.- Que la Puzolana Problema  $W_1$ , situada en el extremo de menor valor de la misma, es la mas próxima de todas a una referencial silícica (o férrica en su caso?), no debiéndose deducir, sin mas por ello, que obligatoria y necesariamente tenga que serlo, y
- 2º.- Que la Puzolana Problema  $W_2$ , situada en el extremo opuesto de la misma es la mas próxima de todas a una referencial aluminica, no debiéndose deducir, sin mas, por ello, que obligatoria y necesariamente tenga que serlo.

- 6.- Que para decir que una Puzolanada dada W, aumenta ó disminuye la RS de un cemento portland, PY, solo, en un cemento de mezcla PA ó PUZ dado, se tendrá que cumplir:

- 1º.- Que

		(aumento RS)	
$\bar{\Delta}L_{28d}$	PY	$\bar{\Delta}L_{28d}$	PY
	Puzolana $W_2$		
	(PA ó PUZ)		
		(disminución RS)	

- 2º.- Iguales condiciones afines a cada caso, expuestos en la 2ª base para el diagnóstico, apartados (a), (b) y (c), en especial el (a) y el (c).

Y todo ello no implicará obligatoria y necesariamente:

1º.- Que el mismo, PA ó PUZ,

- pase a ser (aumento de RS), ó

- deje de ser (disminución de RS),

respectivamente, de "elevada resistencia al ataque de los iones sulfato".

2º.- Que en el (los) correspondiente(s) cemento(s) de mezcla PA y/o PUZ, hermano(s) menor(es) y/o mayor(es) de aquél(los), tenga(n) del mismo modo aunque distinta cuantía, mayor o menor grado de RS que el cemento portland matriz PY (ó P).

3º.- Que tan sólo aquella Puzolana que

- aumente la RS del cemento portland PY, o bien la

- disminuya sin dejar de ser de elevada RS el cemento de mezcla 60/40 resultante, se podrá decir que es ADECUADA ó APROPIADA, para dicho cemento portland PY, y lógicamente también lo podrá ser, por tanto, para cualquier P, no pudiéndose decir otro tanto en caso contrario, en cuyo supuesto tan sólo es extrapolable la adecuación de la misma a cualquier otro cemento portland P' de composición química y características físico-químicas muy similares a las del P anterior, habiéndose de confirmar siempre, y antes de su utilización en obra, su adecuación, ó no, "anti-sulfato" correspondiente mediante algun(os) ensayo(s) acelerado(s) adecuado(s) para tal fin.

4º.- En cualquier caso, la generalidad anterior no implicará obligatoria y necesariamente su cumplimiento taxativo en cualquier otro(s) cemento(s) de mezcla PA y/o PUZ, mas o menos próximo(s) al anterior prefijado, de igual o distinto cemento portland matriz constitutivo.

#### 5ª Aplicación

#### CALIFICACION Y CUALIFICACION DEL CARACTER DE UNA(S) PUZOLANA(S) DADA(S) MEDIANTE LOS PARAMETROS R<sub>MF</sub> Y/O R<sub>MC</sub> EN PROBETAS DE MORTERO ASTM C 452, DE 1X1X6 CM.

##### 5ª.1ª.- Fundamento del Método

El método consiste en averiguar la R<sub>MF</sub> y R<sub>MC</sub> a las edades de 1, 3, 7, 14, 21 y 28 días (adicionalmente 60 y 90 días si se juzgase necesario) de probetas de 1 x 1 x 6 cm de un mortero selenitoso ASTM C 452,

cuya mezcla-conglomerante cemento de mezcla PA y PUZ a ensayar mas yeso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , tiene un contenido porcentual ponderal del 7,0% de  $\text{SO}_3$ .

Las características físico-químicas tanto de la(s) Puzolana(s) a ensayar como del Cemento Portland que se elija para dicho fin, habrán de ser idénticas a las expuestas de ambos en la 4ª Aplicación anterior, con la salvedad de que en este caso se utilizará únicamente un Cemento Portland de escaso a nulo contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_3\text{S}$  (siendo el ideal  $\text{C}_2\text{S}$  puro) a una finura de  $2600 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{g}$  (en caso de no disponer del mismo y si en cambio de otro de mediano o elevado contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  se ha de tener en cuenta que a mayor contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  del mismo, menor grado de finura deberá poseer aún).

Las determinaciones físico-químicas previas tanto de la(s) Puzolana(s) como del Cemento Portland PY elegido serán idénticas a las expuestas de ambos en la 4ª Aplicación anterior.

Los cementos de mezcla de laboratorio a preparar y ensayar Cemento PY  
Puzolana H'  
elegido, serán 30/20, 70/30 y 60/40, en pesc.

Se aplicarán las dos versiones del método ASTM C 452 empleando la cantidad de mortero correspondiente para romper al menos 6 probetas por edad, determinándose el valor medio correspondiente de al menos cuatro valores concordantes.

#### 5ª.2ª.- Bases para el Diagnóstico

Para poder decir que una Puzolana silico-aluminosa es mas aluminica que silfíca los valores de los RMF y los RMC de sus probetas respectivas así ensayadas, deberán aumentar apreciablemente (notablemente para eminentemente aluminica) con la adición de puzolana, debiéndose verificar este hecho mejor en RMF y en al menos dos de los cementos de mezcla (preferentemente el 70/30 y/o el 60/40) en una de las edades iniciales del ensayo y una de las aguas de amasado empleadas, debiendo llegar a ser a igualdad de edad inicial del ensayo, todos ó sólo alguno(s), mayores que las correspondientes a las probetas de su cemento matriz PY sólo. En caso contrario, la puzolana podrá ser "silfíco-aluminosa" ó "silfíca" ó "ferrica" ó no puzolana, siendo entonces su composición química y/o su  $\frac{a}{c}$  los que la diferencien, en especial la composición química.

#### NOTA ADICIONAL

Los resultados y conclusiones obtenidos de esta propuesta de método acelerado de ensayo, destinado a conocer mejor aún el "carácter" de la puzolana ensayada,



podrían obtenerse quizás con alguna mayor rapidez conservando las probetas preparadas a propósito:

- a) ó en atmósfera saturada de humedad a 40° C y/o
- b) sumergidas bajo agua potable filtrada a 40° C.

Asimismo en este método acelerado de ensayo con mortero ASTM C 452 ó H-1 (véase Aplicación XII, 8ª, venidera), tanto el tipo de arena como su granulometría para confeccionarlo(s), no tiene por que ser la indicada expresamente por la norma ASTM C 452, pudiéndosela sustituir por cualquier otra equivalente pero a condición de que la misma sea la que siempre se emplee para estos fines. Y otro tanto podría decirse tanto del tipo de probeta como del mortero que la constituye, los cuales podrían llegar a ser quizás los normalizados por el actual Pliego RC-75, o sea, de 4x4x16 cm y mortero "selenitoso" (con 7,0% ó 21,0% de SO<sub>3</sub>), o no quizás, 1:3, respectivamente.

No obstante y en cualquier caso, las bases para el diagnóstico habrán de ser siempre las anteriores propuestas citadas, no siendo extrapolables a la realidad, los valores absolutos que se obtuvieron en el caso del empleo de la t° de curado citada de 40° C, a diferencia de como ocurre en la Aplicación 11ª venidera.

#### 6ª Aplicación

#### CALIFICACION Y CUALIFICACION DE UN CEMENTO PORTLAND COMO DE ELEVADA O MODERADA, SEGUN EL CASO, RESISTENCIA AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO, MEDIANTE EL METODO ACELERADO DE ENSAYO HISPIDO-1.

Para tratar de juzgar, calificar y cualificar a un Cemento Portland como de elevada o moderada, según el caso, resistencia al ataque de los iones sulfato, se ensayará el mismo -siempre que cumpla con la normativa vigente y en especial en lo concerniente a la superficie específica o finura de molido del mismo-, según se especifica expresamente en la parte operatoria del mismo expuesta en el apartado VIII.3.1. de este trabajo, el  $\bar{A}L(\%)$  de sus probetas a la edad de,

- 14 días de las mismas, para los cementos portland

- . de elevada RS (contenido de C<sub>3</sub>A  $\leq$  5% y (C<sub>4</sub>AF + 2C<sub>3</sub>A)  $<$  25% (6)), deberá ser .....  $\leq$  0,034%, y para los
- . de moderada RS (contenido de C<sub>3</sub>A  $<$  8% (6)), deberá ser 0,034%  $\leq \bar{A}L_{14d} \leq$  0,062% y/o a,

- 28 día de las mismas, para los cementos portland,

- . de elevada RS, deberá ser .....  $\leq$  0,044% y para los
- . de moderada RS, deberá ser ..... 0,044%  $\leq \bar{A}L_{28d} \leq$  0,095%

Tales valores y en especial los de la edad de 28 días, se deberán considerar por tanto, según el autor de este trabajo, como el único y fundamental criterio, exigible en su momento si procede, para poder calificar a un Cemento Portland, como de elevada o moderada, respectivamente, resistencia al mencionado ataque agresivo.

#### 7ª Aplicación

CALIFICACION Y CUALIFICACION DE UN CEMENTO DE MEZCLA PA O PUZ (CONSTITUIDO UNICAMENTE POR CEMENTO PORTLAND Y PUZOLANA(S)) Y/O DEL CARACTER DE UNA(S) PUZOLANA(S) DADA(S) QUE FORMA(N), O NO, PARTE INTEGRAL DE AQUEL(LOS), MEDIANTE EL PARAMETRO  $\bar{\Delta}L$ , y/o 28d. DEL METODO ACELERADO DE ENSAYO HIBRIDO-1.

- 7ª.1ª.- Para tratar de calificar y juzgar a tal(es) cemento(s) de mezcla PA ó PUZ como de elevada o moderada, según el caso, resistencia al ataque de los iones sulfato, se ensayará el mismo -siempre que cumpla con la normativa vigente y en especial en lo concerniente a la superficie específica o finura de molido del mismo-, según específica expresamente la parte operatoria del mismo expuesta en el apartado VIII.3.1. de este trabajo, el  $\bar{\Delta}L(\%)$  de sus probetas a la edad de 28 días de las mismas,
- para los cementos portland de elevada RS deberá de ser ....  $\leq 0,044\%$  y
  - para los cementos portland de moderada RS deberá de ser ...  $0,044\% \leq \bar{\Delta}L_{28d} \leq 0,095\%$

- 7ª.2ª.- A continuación se ha de incluir aquí íntegramente el apartado 2ª de la 4ª Aplicación, pero con la diferencia de que en este caso
- la mezcla-conglomerante selenitosa, cemento a ensayar mas yeso, tendrá un 21,0% de  $SO_3$  y no un 7,%, como en aquél caso, y
  - las especificaciones correspondientes a emplear serán las expuestas en el punto anterior.

#### 8ª Aplicación

CALIFICACION Y CUALIFICACION DEL CARACTER DE UNA(S) PUZOLANA(S) DADA(S) MEDIANTE LOS PARAMETROS RMF Y/O RMC DE PROBETAS DE MORTERO HIBRIDO-1, DE 1 X 1 X 6 CM

Se operará en todo igual que se hiciera en la Aplicación N.º solo que en este caso

- la mezcla-conglomerante selenitosa, cemento a ensayar mas yeso, tendrá un 21,0% de  $SO_3$  y no un 7,0%, como en aquél caso, y
- las Bases para el Diagnóstico serán todas ellas las mismas, sólo que los valores absolutos correspondientes a los que se apliquen serán de bastante menor valor.

#### 9ª Aplicación

CREACION Y DEFINICION DEL LIMITE DE RESISTENCIA AL ATAQUE DE LOS IONES SULFATO LRS ó "LIMITE DE RESISTENCIA SULFATICA", , DE UN CEMENTO PORTLAND O DE MEZCLA PA o PUZ preparados con puzolana(s) hasta un 40% en peso.

Es el número de meses (de 30 días) o la fracción de ellos que tarda en truncarse el crecimiento del valor de la RMF de sus probetas de mortero 1:2,75

de 1x1x6 cm, preparadas y conservadas según el método de ensayo HIBRIDO-1 (21,0% de  $CO_2$  en la mezcla-conglomerante cemento a ensayar más yeso)

Según este límite y los resultados experimentales obtenidos, el número mínimo de meses para un cemento, ver Tabla 91

LÍMITE DE RESIST. SULFÁTICA Nº MIN. DE MESES PARA UN CEMENTO :	
Portland	PA y PUZ
TRES	CINCO
UNO	TRES

- de elevada RS, deberá de ser .....
- de moderada RS, deberá de ser.....

No obstante este límite se podría hacer más preciso aún, expresándolo en días, sin más que preparar para su rotura diaria un número adecuado de probetas para tal fin, objetivo éste no planteado en este trabajo de Tesis.

Como aclaración adicional se ha de decir que determinados cementos P ó PY, solos ó de mezcla con Puzolana(s) hasta un 40%, en peso, podrán mostrar, en su caso, dos valores del LRS,

- uno que se producirá presumiblemente durante los primeros 28-60 días de edad de las probetas, y
- otro, que se producirá presumiblemente desde la edad de 90-180 días de edad en adelante,

en tales casos, se adoptará como valor del LRS del cemento ensayado, el obtenido durante las edades iniciales 28-60 días antes citadas.

#### 10ª Aplicación

DOSIFICACION DE CEMENTOS DE MEZCLA PA Y/O PUZ, CONSTITUIDOS UNICAMENTE POR Cemento Portland (ó Clinker Portland en su caso), Puzolana(s) y Yeso, PARA UN FIN DETERMINADO, Y SUS POSIBLES REPERCUSIONES TECNOLOGICAS EN LA FABRICACION Y CONTROL DE CALIDAD DE TAL(ES) CEMENTO(S) DE MEZCLA Y SIMILARES:

- 1º.- En primer lugar se le tendrá que determinar a la(s) Puzolana(s) constitutiva(s) del Cemento de Mezcla que se desea preparar su CARACTER o "intencionalidad de comportamiento" mediante alguna(s) de las Aplicaciones propuestas para dicho fin, véase las Aplicaciones, 2ª.2º, 4ª.2º, 5ª, 7ª y 8ª.
- 2º.- Determinado el CARACTER de la(s) Puzolana(s) a emplear, se verán las posibilidades de utilización de la(s) misma(s) para el fin propuesto, y en caso negativo sustituirla(s) por otra(s) mas ADECUADA(S), para preparar el Cemento de Mezcla PA ó PUZ correspondiente mas adecuado para el mismo.
- 3º.- Determinado el CARACTER de la(s) Puzolana(s) y conocido el fin propuesto (éste último en función de las características intrínsecas del terreno y la propia obra civil que sobre él se va a asentar), y en el supuesto de la probable validez de aquella(s) para el mismo, se deducirán:

- a) Las Condiciones Generales de fabricación y curado del hormigón que se pretende para cada fin (véase el Consejo Práctico XI, 12º anterior, y las Aplicaciones XII, 11º y 12º venideras), y con todo ello
- b) La Composición mineralógica mas ADECUADA (contenidos de  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ,  $C_3S$  y  $C_2S$  por este orden de importancia) del Cemento Portland (ó Clinker Portland) que se deberá emplear para ser mezclado con aquella(s).

No obstante la realidad impone que ésto último no siempre puede ser posible,

- bien porque en la fábrica en cuestión no se fabrica expresamente tal Cemento Portland (Clínker Portland), en cuyo caso y en la medida de lo posible se debería intentar fabricarlo, ó
- bien por que en la fábrica en cuestión se fabrican Cementos Portland (Clínkeres Portland) de elevado y bajo contenido de  $C_3A$ , respectivamente, en cuyo caso todo se reduciría a un sencillo problema de mezclas enrambos para alcanzar el de composición mas ADECUADA (en  $C_3A$  principalmente) para el fin propuesto.

4º.- En el supuesto de que el fin deseado sea alguno de los que han quedado definidos en el Consejo Práctico XI, 8º, a él habremos de remitirnos - y además a las partes afines de los siguientes, hasta el 21º inclusive-, para la elección en "calidad" de cada uno de los componentes del Cemento de Mezcla PA ó PUZ correspondiente deseado.

Y para determinar la "cantidad" MAS ADECUADA de cada uno de los mismos, se tendrá en cuenta los Fundamentos de Dosificación que se exponen en el punto 5º siguiente.

5º.- No obstante y pese todo lo anterior, la realidad mas común será la de determinar LA DOSIFICACION MAS ADECUADA de un Cemento de Mezcla PA ó PUZ constituido(s) únicamente por Cemento Portland, P ó PY (ó su Clínker respectivo), Puzolana(s), W, y Yeso, para que el (los) mismo(s) a la hora de su utilización proporcione(n) los máximos valores posibles de RMF y/o RMC a la edad de 28 días (sin tener en cuenta el valor del  $\bar{\Delta}L_{28d}$  correspondiente, siempre y cuando que por su magnitud se pueda preveer la escasa nocividad del mismo).

Para ello se hace necesario definir previamente una serie de conceptos básicos generales inherentes al fin propuesto, los cuales son los siguientes:

5º.1.- "ACCION SINERGICA MAXIMA" DE UN CEMENTO DE MEZCLA PA O PUZ (ó mejor de su(s) Puzolana(s) constitutiva(s) en exclusiva).

Es aquella que origina en probetas de mortero sélenitoso -de contenido OPTIMO DE YESO (véase el punto 5º.2. venidero)-, 1:2,75 (según este



trabajo, pero modificable quizás al normalizado 1:3 preparado con arena silícea cuyo coeficiente de forma, densidad de conjunto, peso específico aparente y coeficiente de absorción de agua, según la norma española NLT-154/76 (294) sean coincidentes o muy similares a los de la arena normalizada norteamericana ASTM 773-741 (264)) de,

- 1"x1"x1 1/2", su máximo valor del  $\bar{\Delta L}_{28d.}$ , el cual, tras permanecer prácticamente invariable a edades posteriores y por mucho que se prolongue el ensayo, se alcanzará,
- . mucho antes de dicha edad de 28 días y con tanta mayor proximidad a la edad inicial de 7 días, y
- . con tanta mayor proximidad al valor absoluto alcanzado en este trabajo (superándolo incluso en ocasiones) por la puzolana aluminica M, en cada caso afín (menor estabilidad de volumen inicial), y de
- 1x1x6 cm (según este trabajo, pero modificable quizás a las normalizadas de 4x4x16 cm, y/o cualquier otra(s) afín(es)), su mayor valor de  $RMC_{28d.}$  y/o  $RMF_{28d.}$  (y en su caso  $RMT_{28d.}$ ), el (los) cual(es) se hará(n) de tanta mayor proximidad a la velocidad de consecución de los mismos -a edades iniciales de 1 a 28 días y a más inicial mejor-, al (a los) alcanzado(s) en este trabajo por la puzolana aluminica M en cada caso afín,

cuanto más eminentemente "aluminica" sea la Puzolana Problema (y al contrario en todo lo ocurrible citado, cuanto más eminentemente "silícica" y celítico el Cemento Portland (ó Clínter Portland) que la acompañe (el cual y según este trabajo, tendrá que tener también su OPTIMO DE FINURA DE MOLIDO correspondiente para dicho fin, al igual que la puzolana), y viceversa.

No obstante el grado de finura de molido óptimo de la puzolana deberá resultar ser mayor que el del clínter portland más el regulador de fraguado adecuado (véase lo dicho al respecto al final de esta Aplicación) que la acompañe, al objeto de que aquélla muestre su máxima ADECUADA actividad puzolánica preludio de una mayor acción sinérgica expansiva y mayores valores de  $RMC$  y  $RMF$  a edades iniciales especialmente. Ello deberá implicar por tanto la molienda por separado,

- ( - bien en paralelo (en dos molinos diferentes), ó
- bien alternativamente (en un único molino)
- pero seguidos ámbos del tezlado subsiguiente),

y ADECUADA

- del clínter portland más el regulador de fraguado, y
- de la Puzolana (véase lo dicho al respecto al final de esta Aplicación) de tal modo que una vez mezclados, el producto acabado o cemento de mezcla resultante, no posea una extremadísima superficie específica que menoscabe su buen comportamiento en la realidad.

En tales casos respectivos originados conjuntamente, y de mayor proximidad a los de la Puzolana M de este trabajo, más y mejor se podrá definir al Cemento de Mezcla ensayado como EXPANSIVO tipo M-S (ó tipo M, con PY), y viceversa, en cuyo caso, menores valores de  $\bar{\Delta L}_{máx.28d.}$  (mayor estabilidad de volúmen) y de  $RMF_{máx.28d.}$  respectivamente, se obtendrán, con lo que más y mejor se podrá definir al cemento de mezcla ensayado como PA ó PUZ, constituido únicamente por Portland, P ó PY, (Cemento ó Clínter), Puzolana(s) y Yeso.

A igualdad de Puzolana acompañante y sea cual fuere el "carácter" de la misma, tal coincidencia de valores máximos de  $\bar{\Delta L}_{28d.}$  y de  $RMC_{28d.}$  y/o  $RMF_{28d.}$  se podrá alcanzar más fácil y seguramente con un Cemento (ó Clínter) Portland PY que con un P, aunque con aquél, PY, de menor valor absoluto que con éste, P, por menor ACCION SINERGICA EXPANSIVA producida.

A continuación téngase en cuenta además las Deducciones 4, 4\*, 5\* y 6\* (anteriores).

Esta ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA así definida y determinada, garantizará las máximas RM y RS a un tiempo del cemento de mezcla correspondiente.

Por otra parte también se ha de hacer constar en este punto que podrán originarse casos, intencionadamente o no, en los que no exista correspondencia TOTAL entre los valores máximos  $\bar{\Delta L}_{28d.}$  y  $RMC_{28d.}$  y/o  $RMF_{28d.}$ . Pues bien, en tales casos, lógicamente deberán primar los valores máximos correspondientes de  $RMC_{28d.}$  y/o  $RMF_{28d.}$  -dado que la práctica más común no será construir en terrenos selenitosos- sobre los de  $\bar{\Delta L}_{28d.}$ , siempre y cuando, claro está, estos últimos no resultaren de tal magnitud que pudieran afectar peligrosamente, en su caso, a la estabilidad de volúmen de los elementos que se hormigonasen con tales mezclas-conglomerantes selenitosos, véase el Consejo Práctico 209. Y todo lo contrario, es decir, primar el valor de  $\bar{\Delta L}_{28d.}$  sobre el valor  $RMC_{28d.}$  y/o  $RMF_{28d.}$ .

No obstante y en cualquier caso, siempre se podrá buscar entre la conjunción de tales parámetros,  $\bar{\Delta L}$ ,  $RMC$  y/o  $RMF$ , aquél otro OPTIMO DE YESO (u "Optimo de  $SO_3$ ") -distinto, claro está, del que se especifica a continuación en el punto 59.2. venidero-, que proporcione o garantice los máximos valores posibles de  $RMC_{28d.}$  y/o  $RMF_{28d.}$ , y a la vez.

- la máxima ESTABILIDAD DE VOLUMEN:  $\bar{\Delta L}_{28d.}$  = mínimo (siendo el ideal 0,00%), ó bien
- la ADECUADA ESTABILIDAD DE VOLUMEN:  $\bar{\Delta L}_{28d.} < \bar{\Delta L}_{ADECUADO, 28d.} < \bar{\Delta L}_{máx. 28d.}$ , que permita cada elemento hormigonado (en su caso la obra civil completa), sin peligro alguno para la DURABILIDAD del (de la) mismo(s).

(4\*)

En tales casos citados -posiblemente los más comunes- no ha lugar hablar de ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA, sino de ACCION SINERGICA EXPANSIVA ADECUADA para cada objetivo concreto, y a su OPTIMO DE YESO (u "Optimo de  $SO_3$ ") su OPTIMO DE YESO (u "Optimo de  $SO_3$ ") ADECUADO para dicho fin, según se especifica en el punto siguiente 59.2.

#### 59.2.- OPTIMO DE YESO (u "Optimo de $SO_3$ ") de un Cemento de Mezcla PA ó PUZ.

Es la cantidad de yeso,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , o sea, de regulador de fraguado, de granulometría la especificada por la norma ASTM C 452 (215) (ó quizás cualquiera diferente, pero igualmente la más ADECUADA para el fin propuesto) necesaria para alcanzar la MAXIMA ACCION SINERGICA EXPANSIVA posible correspondiente en cada caso. Dicho OPTIMO DE YESO (y "Optimo de  $SO_3$ ") para originar la ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA citada en cada caso de Cemento de Mezcla anterior, podrá ser compatible, o no, con las características de la propia obra civil ó elemento(s) hormigonado(s) de la misma. Por lo que en caso de:

- a) COMPATIBILIDAD, tal OPTIMO DE YESO (u "Optimo de  $SO_3$ ") será el ADECUADO para dicho fin, y por tanto de igual valor absoluto, o sea,

ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA = ACCION SINERGICA EXPANSIVA ADECUADA, es decir, "Optimo de  $SO_3$  máximo" = "Optimo de  $SO_3$  adecuado", mientras que en el caso de

- b) INCOMPATIBILIDAD, tal OPTIMO DE YESO (u "Optimo de  $SO_3$ ") no será el ADECUADO para dicho fin, y por tanto de distinto valor absoluto, o sea, ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA > ACCION SINERGICA EXPANSIVA ADECUADA, es decir, "Optimo de  $SO_3$ " MAXIMO > "Optimo de  $SO_3$ " ADECUADO, por lo que la cantidad de YESO OPTIMA (u "Optimo de  $SO_3$ ") será en este caso, la ADECUADA, y no en cambio la MAXIMA, de aquí que ambas deban ser cuantitativamente distintas entre sí, con mayoría de esta última sobre aquella.<sup>5\*</sup>

Por lo cual y para una Puzolana dada ambos casos posibles a) y b) citados, podrán ser tanto más uno solo, cuanto

- menor sea el contenido de  $C_3A$  del Cemento (o Clínter) Portland que la acompañe, o sea, cuanto más PY que P fuere el mismo, y cuanto
- menos eminentemente aluminica - alúmino-silícica, sílico-aluminica, silícica y las férricas correspondientes, por este orden - fuere aquella,

es decir, cuanto menor sea la ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA resultante entrambos, con lo cual más y mejor se podrá igualar a la ACCION SINERGICA EXPANSIVA ADECUADA, o lo que es lo mismo, más y mejor será esta última ambas cosas, LA MAXIMA y LA ADECUADA, a un tiempo.

No obstante y en cualquier caso conviene recordar al efecto:

- 1º.- Que en vista de que el FUNDAMENTO para la consecución de la DOSIFICACION OPTIMA DE YESO (u "Optimo de  $SO_3$ ") en cada caso de Cemento de Mezcla citado, es el de tratar de beneficiarse en la medida necesaria en cada caso- de la expansividad derivada de la génesis de la ett-1f 1<sup>ria</sup> y/o ett-rf 1<sup>ria</sup> -o mejor de la ett-Total 1<sup>ria</sup> en cada caso- haciéndola provechosa y no nociva, según lo dicho al efecto en los apartados c) y d) del Cap. IV, pag. 28, es por ello por lo que la permanencia (o mejor quizás, presencia) en el tiempo de aquella, inicialmente formada -la ett-Total 1<sup>ria</sup> y/o ett-rf 1<sup>ria</sup>-, en cada caso tendrá que ser necesariamente garantizada. Por lo que cada OPTIMO DE YESO (u "Optimo de  $SO_3$ ") anterior se deberá ver ligera y mínimamente incrementado, por exceso, respecto del obtenido, en un principio, sin menoscabo en ningún caso del objetivo  $\Delta L_{\text{máx.28d}}$  y/o RMF  $\text{máx.28d}$  y/o RMC  $\text{máx.28d}$  pretendido; por lo que quizás para ello y en ocasiones, tal ligero mínimo exceso de Yeso propugnado, tenga que ser aportado, ya no como  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (yeso), sino como  $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$  (escayola)<sup>6\*</sup> y/o  $CaSO_4$  - (anhidrita soluble). De aquí que por ello convenga denominar mas precisamente en adelante "OPTIMO DE  $SO_3$ " de un Cemento de Mezcla,

EXPANSIVO, PA y PUZ, o mejor de su(s) Puzolana(s) constitutiva(s) en exclusiva, que OPTIMO DE YESO del (de los) mismo(s) (causa por la cual y desde el inicio de este apartado, adjunto a esta denominación última ha aparecido siempre aquella);

2ª.- Que tales OPTIMOS DE  $SO_3$  anteriores, así como su determinación tecnológica, se han propugnado a constancia de finura de molido de la(s) Puzolana(s) constitutiva(s) respectiva(s) en todos los casos ( $20\% \pm 1\%$  de retenido en el tamiz de  $45\mu\text{mm}$  de luz de malla). Por lo que cualquier variación que se introduzca en el valor constante de finura de molido de la(s) misma(s), citado y/o así mismo en el de sus acompañantes - Cemento (ó Clinker) Portland, P ó PY, y/o Yeso, y/o Escayola, y/o Anhídrita Soluble -, respectivos, deberá traer consigo una variación de los valores absolutos de los nuevos  $\bar{A}L_{\text{máx.28d}}$  y/o  $RM_{\text{máx.28d}}$  que se obtengan, y sobre todo, de su OPTIMO DE  $SO_3$  correspondiente, aunque no en cambio su fundamento; y

3ª.- Que tales OPTIMOS DE  $SO_3$  respectivos anteriores no garantizarán necesariamente que sus Cementos de Mezcla, EXPANSIVOS o PA o PUZ (constituídos únicamente por Cemento ó Clinker Portland, P ó PY, Puzolana(s) y Yeso y/o Escayola, y/o Anhídrita Soluble) posean además un grado moderado, elevado o muy elevado de RS, el cual se le(s) habrá de determinar obligatoriamente antes de su puesta en obra, en el caso de que la misma se vaya a asentar en terrenos selenitosos, mediante alguno(s) de los métodos acelerados de ensayo propuestos a la luz de este trabajo (véase Aplicaciones 2ª.1ª, 4ª.1ª y 9ª) proscribiéndose su uso en el caso de que no satisfagan alguno de ellos.

Y a su vez cada uno de tales OPTIMOS DE  $SO_3$  citados:

- a) Será DISTINTO, si para tal fin se emplea el Cemento Portland ADECUADO o su Clinker Portland correspondiente con una finura de molido ADECUADA (y otro tanto si ambos - Cemento ó Clinker y finura de molido - no son los mas ADECUADOS para el mismo),
- b) Podrá ser incluso tanto mayor - llegando a superar a la del 8,602% ( $4,00\% SO_3$ ) y  $7,527\%$  ( $3,50 SO_3$ ), respectivamente, normalizadas para los Cementos de Mezcla PA y PUZ (2) (pero sin deber de sobrepasar jamás el valor del  $15,0\%$ ) -, cuanto más "alumínica" sea la Puzolana Problema y "celítico" el Cemento Portland (ó Clinker Portland) que la acompañe (el cual a su vez habrá de ser además de superficie específica tanto mas ADECUADA cuanto mas celítico sea el mismo, y viceversa, para dicho fin), y viceversa, ó PY, ambos constitutivos



- del (los) Cemento(s) de Mezcla, formado(s) únicamente por Portland P ó PY (a sus Clínteres respectivos), Puzolana(s) y Yeso (y/o escayola y/o Anhídrito Soluble) que se ensayan,
- c) Será distinto, al menos en fundamento, al de un Clínter Portland P ó PY, sea o no, constitutivo de aquél(los).

Finalmente y como aclaraciones adicionales de estos dos puntos anteriores 5º.1. y 5º.2., expuestos de la presente Aplicación 10ª, se ha de decir que en ambos:

- A) No se aconseja el empleo adicional de una tª de curado en C.H. de 40°C por las razones aducidas al final de la Aplicación 5ª anterior.
- B) No es obligatorio el empleo específico de la arena de Ottawa del ensayo ASTM C 452 para confeccionar el mortero 1:2,75 (ó 1:3 en su caso), pudiendo ser lógicamente cualquier otra APROPIADA para tales fines, a condición de que siempre sea la misma y guarde por tanto constancia en su calidad y granulometría adecuadas, así como también igualdad ó gran proximidad entre los valores de los parámetros determinados con la misma y con la de Ottawa.
- C) Puede no ser obligatorio el empleo del tipo de probeta de 1x1x6 cm, según lo dicho al respecto en el punto 5º.1., aunque lógicamente la rapidez de respuesta de éstas, de 1x1x6 cm, podrá ser mayor que con cualquier otra(s) normalizada(s), o no, de dimensiones superiores, con las ventajas al caso.
- D) Los valores máximos de las RMF y/o RMC a las edades de 1,3,7 días, incluso 14 días, pueden ser tan interesantes como el de la edad de 28 días -o mas quizás- (otro tanto y en su caso los correspondientes valores del  $\Delta L$  de probetas de 1"x1"x11½" de idéntico mortero), sobre todo, cuando se trate de DETERMINAR LA DOSIFICACION MAS APROPIADA DE LA MEZCLA, Cemento (o Clínter) Portland, P ó PY, más Puzolana(s) más Yeso, (y/o Escayola y/o Anhídrito Soluble), para cada caso concreto.
- E) Se empleará relación  $\frac{a}{b}=c=0,485$  ó  $\frac{a}{b}=d,6$  que más conviniere al caso. En el mismo sentido y como aclaración adicional de este punto 5º tratado globalmente, se ha de decir que en este caso no es imprescindible, pero si aconsejable, conocer previamente el CARACTER de la Puzolana a emplear, para preparar los cementos de mezcla PA y PUZ citados, y también el grado de estabilidad de volúmen correspondiente ( $\Delta \bar{V}_{28d}$ , L-A,  $\Delta \bar{V}_{L28d}$  ASTM C 452 e H-1)

Todo ello como se puede observar, no menoscaba en absoluto el FUNDAMENTO que deberá guiar en adelante LA DOSIFICACION DE LOS CEMENTOS DE MEZCLA constituidos, en este caso, únicamente por Cemento (ó Clínter) Portland, P ó PY, Puzolana(s) y Yeso (y/o Escayola y/o Anhídrito Soluble) como Regulador de Fraguado, donde los parámetros "calidad" y "cantidad" y "finura de molido" ADECUADOS de cada uno de tales componentes, por separado, serán los auténticos protagonistas, o sea, de vital importancia, para la consecución de cada fin propuesto, pudiendo ser en principio y lógicamente.

ampliables, tales FUNDAMENTOS DE DOSIFICACION citados, a aquellos otros Cementos de Mezcla que empleen Escoria(s) Siderometalúrgica(s) en lugar de Puzolana(s) (trabajo éste en marcha para determinar igualmente con precisión la relación tecnológica existente entre el posible rango de variabilidad de las mismas -"calidad y cantidad"- así como del Cemento -ó Clínter Portland, P ó PY, que las acompañe-, y su comportamiento en un medio sulfático agresivo).

De todo lo cual se deduce que a partir de este momento y en las especificaciones correspondientes a tales tipos de Cementos de Mezcla, Cemento (ó Clínter) Portland, P ó PY, Puzolana(s) y Yeso (y/o Escayola y/o Anhidrita Soluble), el parámetro  $\bar{A}L_{\text{máx.28d.}}$  ó Grado de Estabilidad de Volúmen (determinado mediante el método ASTM C 452 ó cualquier otro ADECUADO y similar en Fundamento) tendrá que ser de igual grado de protagonismo e importancia, entre otros, que los actuales de RMF y RMC a las edades de 1, 3, 7 y 28 días, y Tiempo de Fraguado. Por ello se hace necesario el poder disponer de una arena española equivalente a la de Ottawa para la consecución, a igualdad de edad, de los mismos ó muy parecidos valores de cada uno de tales parámetros citados que la prrecisan para su determinación.

Por lo tanto y según todo lo anterior, en lo sucesivo será posible que un cemento de mezcla -constituído por Portland (Cemento ó Clínter más regulador de fraguado, según sea el caso, aunque con desventaja de aquél sobre éste para el fin propuesto) y Puzolana(s) únicamente-, alcance un valor notable de RMC y RMF en mortero normalizado (1) sin necesidad de proporcionarle, como hasta ahora, una elevada superficie específica para dicho fin, y más aún para los de matriz PY que P.

Ello deberá traer como consecuencia la molienda por separado (véanse las razones justificativas en la Interpretación VIII.2.2.2.3 (E)(F) de la Discusión 2ª b), pág. 414-a) y siguientes),

- bien en paralelo (en dos molinos diferentes), ó
  - bien alternativamente (en un único molino),
- y ADECUADA en forma y cantidad de cada uno de sus componentes,
- el Clínter Portland P ó PY, según sea el caso, más el regulador de fraguado adecuado, por un lado, y
  - la(s) Puzolana(s), por otro,
- ó viceversa,
- el Clínter Portland P ó PY, según sea el caso, por un lado, y
  - la(s) Puzolana(s) más el regulador de fraguado adecuado, por otro,

para a continuación proceder a su mezclado subsiguiente.

No obstante y centrándonos en este último caso de la Molienda por Separado de forma alternativa y en un único molino, existe la posibilidad adicional en la misma -independientemente de con quién se añade el regulador de fraguado apropiado, si con la fracción Clínter Portland "X", ó si con la fracción Puzolana(s) "Z"-, que consistirá en lo siguiente:

- 1º.- Moler durante un tiempo,  $t_1$ , sólo la fracción Puzolana(s) en exclusiva hasta un grado de finura de molido dado pero menor que su valor  $ADECUADO_1$  correspondiente, y a continuación y aún estando dicha fracción Puzolana(s) en el molino,
- 2º.- Moler durante un tiempo,  $t_2$ , dicha fracción Puzolana(s), pero ya conjuntamente con la fracción Portland correspondiente, hasta alcanzar el grado de finura de molido  $ADECUADO_3$  del Cemento de Mezcla correspondiente resultante.

De esta manera y durante dicho período adicional de tiempo  $t_2$  de molienda -y homogeneización- conjunta y racional de ambas fracciones en el molino,

- la fracción Puzolana(s) "Z" acabaría por alcanzar su grado de finura de molido, Gfm,  $ADECUADA_1$ ,
- la fracción Clínter Portland correspondiente, su grado de finura de molido  $ADECUADA_2$ , pero ya para entonces formando parte de la Mezcla, y
- dicha Mezcla resultante, ó mejor el Cemento de Mezcla resultante, su grado de finura de molido  $ADECUADA_3$ .

Con ello y por lo general deberá resultar que el,

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Gfm } ADECUADA_1 & > & \text{Gfm } ADECUADA_3 & > & \text{Gfm } ADECUADA_2 \\
 \Downarrow & & \Downarrow & & \Downarrow \\
 \text{de la fracción} & & \text{del Cemento de} & & \text{de la fracción} \\
 \text{Puzolana(s) "Z"} & & \text{Mezcla resultante} & & \text{Clínter Portland "X"}
 \end{array}$$

Sin embargo y pese a todo lo anterior se ha de reconocer que primará un sistema sobre otro en función de las dificultades tecnológicas y/o económicas que plantee cada caso para alcanzar el (los) objetivo(s) deseado(s).

Por lo tanto y según todo lo anterior se puede resumir todo ello diciendo que,

- (A) a una Pozolana dada, con un grado de finura de molido ADECUADO le deberá corresponder un Cemento Portland ADECUADO con un grado de finura de molido APROPIADO para obtener la ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA<sub>1</sub> ó ADECUADA<sub>1</sub>, según sea el caso,
- (B) a una Pozolana dada, con un grado de finura de molido ADECUADO le podrá corresponder un Cemento Portland DETERMINADO con un grado de finura de molido APROPIADO para obtener la ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA<sub>2</sub> ó ADECUADA<sub>2</sub>, según sea el caso,
- (C) a una Pozolana dada, con un grado de finura de molido DETERMINADO le deberá corresponder un Cemento Portland ADECUADO con un grado de finura de molido APROPIADO para obtener la ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA<sub>2</sub> ó ADECUADA<sub>2</sub>, según sea el caso,
- (D) a una Pozolana dada, con un grado de finura de molido DETERMINADO le corresponderá en la mayoría de las ocasiones un Cemento Portland DETERMINADO, el cual no obstante, con un grado de finura de molido APROPIADO podrá alcanzar con aquélla la ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA<sub>2</sub> ó ADECUADA<sub>2</sub>, según sea el caso, y
- (E) a una Pozolana dada, con un grado de finura de molido DETERMINADO le puede corresponder en ocasiones un Cemento Portland DETERMINADO con un grado de finura de molido DETERMINADO para obtener la ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA<sub>4</sub> ó ADECUADA<sub>4</sub>, según sea el caso; no obstante ello será por resultado una ACCION SINERGICA EXPANSIVA que con toda probabilidad no será la MAXIMA<sub>1</sub> ni la ADECUADA<sub>1</sub>, y si lo fuera sería debido a que por esa vez ha habido suerte, teniendo en cuenta además que,

Casos:

(A)	(B) & (C)	(D)	(E)
ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA <sub>1</sub>	ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA <sub>2</sub>	ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA <sub>3</sub>	ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA <sub>4</sub>
>	>	>	>
ó	ó	ó	ó
ADECUADA <sub>1</sub>	ADECUADA <sub>2</sub>	ADECUADA <sub>3</sub>	ADECUADA <sub>4</sub>

Ovviamente el caso primero, ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA<sub>1</sub> ó ADECUADA<sub>1</sub> habrá de ser el de máxima rentabilidad económica y quizás también tecnológica, de la Pozolana en cuestión, siguiéndole las siguientes en el orden citado.

Todo ello es aplicable a cualquier límite ó entorno(s) de adición puzolánica que se considere de antemano, sea cual fuere el contenido de humedad de la misma, aunque lógicamente cuanto menor sea dicho contenido, mayor deberá ser la ACCION SINERGICA EXPANSIVA MAXIMA<sub>n2</sub> ó ADECUADA<sub>n2</sub> correspondiente alcanzada en cada caso y viceversa.

Por lo tanto y según todo lo anterior además de lo dicho al respecto en la Deducción de Interés X. 454, los casos más comunes de los cinco posibles anteriores planteados, deberán ser el (B), (C), (D) y (E), pero sobre todo el (E), ya que por probabilidades deberá ser el caso imperante en la actualidad. Por lo que en tanto en cuanto el caso (E) pueda ser convertido al (D) ó al (C) y al (B) e incluso al (A), sin más que el fabricante correspondiente

- proporcione

. una constancia de características químicas a la puzolana natural o arti-

ficial (ceniza volante en la mayoría de los casos) que normalmente emplea en su fábrica, mediante un proceso previo de pre-homogeneización de la misma, seguido de

- . un grado de finura de molido ADECUADO de ella, para el que habrá de tener en cuenta que el mismo deberá ser tanto mayor cuanto más eminentemente silícica sea dicha puzolana y todo lo contrario cuanto más eminentemente aluminica, y/o

- redosifique su crudo en la medida de lo posible, para obtener un nuevo Clínter Portland (y de éste su Cemento Portland correspondiente) más o menos diferente, según sea el caso, al que venía fabricando, aunque en cualquier caso más ADECUADO en calidad (contenidos de  $C_3A$  y  $C_2S$ , principalmente, entre otros), cantidad y grado de finura de molido, a la puzolana anterior,

más se podrá aproximar al caso (A) ó de máxima rentabilidad tecnológica y económica del cemento de mezcla ternario resultante, y en caso contrario al (D).

#### 11ª Aplicación

CONDICIONES GENERALES DE HORMIGONADO, DESENCOFRADO Y CURADO DE UN HORMIGON TRADICIONAL PREPARADO CON CEMENTO DE MEZCLA PA O PUZ CONSTITUIDO UNICAMENTE POR CEMENTO PORTLAND (O CLINKER PORTLAND), PUZOLANA(S) SILÍCICA(S) Y YESO.

Las condiciones de hormigonado, desencofrado y curado de un hormigón tradicional preparado con un cemento de mezcla PA ó PUZ de puzolana(s) eminentemente silícica(s) sólo, vendrá impuesta por las características y servidumbre de la propia obra civil, de tal modo que,

- a) Si la obra civil es subterránea, sin acceso directo, tales como cimentaciones profundas por pilotajes diversos, inyecciones de hormigón, etc.,
  - se deberá utilizar el sobredimensionamiento a "fondo perdido" de la estructura, mediante una banda protectora de algunos cms. de espesor, de hormigón pobre de cemento portland, y
  - el hormigón de cemento PA ó PUZ, preparado con puzolana(s) silícica(s) con el cual se va a realizar la estructura a proteger, se amasará con una relación (a/c)<sub>1</sub> que sea la menor posible compatible con el proceso de compactación, no debiendo causar extrañeza alguna,
  - . si se producen exudaciones apreciables de aquélla después del hormigonado que sobrenadan la cara descubierta en su caso del mismo, no debiendo quitar ó retirar dicha agua exudada en el caso improbable de que se pudiera tener acceso directo a ella, bajo ningún pretexto, y

. si las resistencias mecánicas características, RMF y RMC, a las edades iniciales de 1, 3, 7 e incluso 28 días resultaren relativamente bajas, pero ascendentes, de aquí que la prueba de carga definitiva se deba posponer incluso a 60 ó 90 días ó a edades posteriores si fuera necesario (293), y

b) Si la obra civil es a cielo abierto y/o subterránea con acceso directo,

- se deberá preparar el hormigón adecuado teniendo en cuenta las observaciones citadas anteriormente al respecto,
- se deberá realizar el desencofrado más tarde que lo normal y lo más tarde que se pueda, humedeciendo periódicamente la cara descubierta, en su caso, del mismo, -evitando al máximo las pérdidas de agua-, pero siendo en este caso el ideal una capa de agua potable de  $\approx 1$  cm de espesor que sobre nade perennemente la cara vista del (los) elemento(s) hormigonado(s) hasta el momento de su desencofrado (por lo cual el molde se deberá proyectar muy estanco y algo sobredimensionado para dicho fin) y una vez desencofrado,
- se deberá realizar el curado muy bien, mediante el riego diario directo ó por aspersión (mejor este último) (293) con agua potable o similar, -evitando al máximo las pérdidas de agua-, de una a cinco veces al menos al día según los casos y la estación del año (siendo no obstante el ideal el baño total ó inmersión total continuada), de la estructura durante al menos los primeros 28 días después del desencofrado del mismo y antes de entrar en contacto con aquél, y siempre y cuando las características del (los) elemento(s) a curar lo permitan, (evitando de forma expresa durante el proceso de curado la posible problemática adicional de las heladas aunque para ello se tenga que hormigonar en otras estaciones del año más apropiadas para ello; y cuando esto sea imposible se habrán de tomar en cada fase de amasado, hormigonado y curado las medidas precautorias propias del caso, para finalmente impermeabilizar adecuadamente si fuera necesario).

Por último y en cualquier caso, se ha de tener en cuenta que el proceso de curado adecuado y sin pérdida de agua deberá prolongarse hasta que el hormigón haya alcanzado, como mínimo, el 70% de su resistencia de proyecto valor éste que se alcanzará con estos cementos de mezcla con seguridad y lentitud, pero esta última tanto menos lenta cuanto

- . mayor sea el tiempo de curado adecuado que se pueda aplicar y viceversa, no siendo de extrañar en absoluto que el mismo pueda ser de 28 días ó mas, y
- . mayor sea la dosificación, Kg del cemento elegido (véase el Consejo Práctico XI, 13<sup>º</sup>) / m<sup>3</sup> de hormigón (en general de  $\approx 400$  Kg/cm<sup>3</sup> hormigón ó incluso netamente superior) empleada para confeccionar el hormigón.

Este tipo de Cementos de Mezcla de puzolanas eminentemente silíceas está especialmente indicado para grandes obras civiles, que van a estar ó pueden estar en contacto con aguas y terrenos selenitosos, en las que el excesivo tiempo de curado del hormigón preparado para la ejecución de las mismas con tales Cementos de Mezcla se podrá compatibilizar adecuadamente, con el tiempo de ejecución de aquéllas, el cual, se subordinará siempre a aquél si fuera necesario. A continuación véase el Consejo Práctico XI, 13º y 34º.

No obstante y en tal sentido existe también la posibilidad adicional de utilizar cuando sea posible un acelerador de fraguado y endurecimiento con la condición de que no menoscabe en absoluto y para nada el fin propuesto con este tipo de hormigones de puzolanas eminentemente silíceas y que tampoco pueda originar problemas secundarios que den al traste con aquél y/o sus armaduras, en su caso. A continuación véase además lo dicho a propósito en los Consejos Prácticos XI, 16º y 29º.

Finalmente, en el supuesto de tratar de hormigonar con una relación  $(a/c)_2$  menor que la obtenida competitiva con el proceso de compactación  $(a/c)_1$  - al objeto de obtener mayores valores de RMC y RMF a edades iniciales especialmente, que las que se obtienen con la  $(a/c)_1$ , se deberá tener en cuenta que el proceso de amasado de los materiales cemento portland P ó PY, puzolana(s) silícea(s), áridos no reactivos, arena y agua de amasado, en la hormigonera será bastante dificultoso por resultar tal mezcla bastante seca ó semi-seca. No obstante prolongando el tiempo de amasado de dicha mezcla en la hormigonera por encima del tradicional (de un 50% al 100%) del empleado por dicha hormigonera de capacidad dada para amasar un hormigón tradicional de cemento portland sólo, se comprobará que ha medida que se prolonga el mismo la mezcla resultante va ganando en trabajabilidad, no comparable quizás a la de un hormigón tradicional de cemento portland, pero sí la suficiente y necesaria para su cuidadosa y adecuada operación de hormigonado.

#### 12º Aplicación

CONDICIONES GENERALES DE ENCOFRADO, HORMIGONADO, DESENCOFRADO Y CURADO DE UN HORMIGÓN TRADICIONAL PREPARADO CON CEMENTO DE MEZCLA PA O PUZ CONSTITUIDO ÚNICAMENTE POR CEMENTO PORTLAND (O CLINKER PORTLAND), PUZOLANA(S) EMINENTEMENTE ALUMÍNICA(S) Y YESO (O MEJOR QUIZAS CEMENTOS EXPANSIVOS).

Según los conceptos básicos generales citados en la Aplicación 10ª anterior, nacidos de los resultados experimentales obtenidos de este trabajo, cuanto más y mejor pueda ser definido el cemento de mezcla como EXPANSIVO tipo M-S ó tipo M (disminuyendo el grado de expansividad en dicho orden) o lo que es lo mismo, su puzolana constitutiva como Alúminica, más semejantes habrán de ser sus condiciones y posibilidades de manejo y utilización para determinadas obras civiles propias de los Cementos EXPANSIVOS, tipo M, K ó S, y en especial

aquellas que hacen referencia a los procesos de encofrado, hormigonado, desencofrado y curado, antes y después del desencofrado, de su(s) hormigón(es) respectivo(s), fundamentándose tales procesos, en general,

- en la utilización de una relación  $\frac{a}{c}$  en cada caso la menor posible compatible con el proceso de compactación,
- en la utilización de una morfología y granulometría de los áridos que con la relación  $\frac{a}{c}$  anterior lo hagan lo más fluido posible, 2\*
- en la máxima estanqueidad posible de la caja o molde correspondiente de la pieza a hormigonar, en todos los casos,
- en una ejecución rápida de la operación de hormigonado, y
- en una hidratación máxima o curado máximo de dicho(s) hormigón(es) (evitando siempre al máximo las pérdidas de agua),

ó aún en su(s) molde(s), para lo cual sobre la cara vista de los mismos sobrenadará permanentemente una capa de agua potable ó similar la cual deberá de ser de tanto mayor espesor cuanto menor es la cara vista del (los) elemento(s) hormigonado(s) y viceversa, (pero siempre teniendo en cuenta en todos los casos la necesidad de arbitrar las medidas más adecuadas al objeto de efectuar con seguridad el curado completo de toda la masa de hormigón). En este caso, dicho período de curado bajo agua potable de al menos la cara vista del (los) elemento(s) hormigonado(s), se prolongará durante al menos los primeros 28 días de edad de aquél(los) pero sin "sacarlo(s) de su(s) molde(s)", o sea, sin haberle(s) efectuado su "desmoldado" ó desencofrado correspondiente, el cual se le(s) deberá efectuar tanto más tardíamente cuanto menor sea la superficie de la cara vista de curado del (los) mismo(s); para de esta manera tratar de provocar el "curado TOTAL" del (los) elemento(s) hormigonado(s) al objeto de aprovechar para auto-pretensado químico de su(s) hormigón(es) constitutivo(s) respectivo(s) la acción sinérgica expansiva resultante de la etf-1f y etf-1f sólo (tipo M), a formar en cada caso en el (los) mismo(s) aún enmoldado(s), ó una vez desencofrado(s), en cuyo caso el curado ideal sería el baño total de agua o "inmersión intencionada", ó similar, del (los) elemento(s) hormigonado(s) durante al menos los primeros 28 días de edad de los mismos, debiéndose tener en cuenta por el técnico proyectista correspondiente (para el dimensionamiento más adecuado de juntas de dilatación y similares), la previsión del sobredimensionamiento adicional del (los) elemento(s) hormigonado(s) una vez curado(s), y similares; y todas aquellas medidas adicionales que amortigüen tales expansiones ulteriores y/o prevengan la posible nocividad de las mismas si no se tienen en cuenta -las cuales en este trabajo y en el peor de los casos, con 7,0% de  $SO_3$ , no han sobrepasado el valor del 0,383% en probetas de 1"x1"x1½" de mortero selenitoso, (7,0%  $SO_3$ ) ASTM C 452-68-, para el (los) elemento(s) confeccionado(s) con tal(es) hormigón(es) más o menos expansivo(s) que expandirá(n) en este caso, durante la fase de curado del (los)



mismo(s); por lo que previamente se le(s) habrá de determinar la cantidad de expansión más probable correspondiente mediante el método ASTM C 452, véase el Cap. XII, APLICACIONES, al objeto de tenerla en cuenta a la hora de la ejecución del proyecto para de este modo evitar desagradables sorpresas ulteriores.

No obstante y en tal sentido existe también la posibilidad adicional de utilizar, cuando sea posible tanto en este caso como en el caso anterior, un retardador de fraguado que permita que todo o la mayor parte del efecto expansivo resultante se desarrolle durante el estado plástico del (los) elemento(s) hormigonado(s), preferentemente aún en sus moldes respectivos, pero que sobre todo no mengüe en absoluto y para nada el fin propuesto, por lo cual se deberá ensayar previamente en un laboratorio especializado; tal retardador de fraguado bien pudiera ser, en principio, un exceso adecuado de yeso para dicho fin, el cual como se acaba de decir se habrá de determinar previa y apropiadamente.

Se ha de recordar que este tipo de curado adecuado no garantizará obligatoriamente una elevada RS del hormigón correspondiente, pues no es este el fin perseguido mediante aquél.

Finalmente y en cualquier caso se ha de tener en cuenta que el proceso de curado adecuado, sin pérdidas de agua, deberá prolongarse hasta que el hormigón haya alcanzado, como mínimo, el 70% de su resistencia de proyecto, valor éste que se alcanzará con estos cementos de mezcla con seguridad y prontitud e incluso rapidez en ocasiones; pero estas últimas de tanto mayor valor absoluto cuanto mayor sea el tiempo de curado adecuado que se puede aplicar y viceversa, no siendo de extrañar en absoluto que el mismo pueda ser de 28 días ó más.

Este tipo de cementos está especialmente indicado para elementos prefabricados de hormigón preferentemente, sin despreciar la posibilidad adicional de construir con los mismos pavimentos de hormigón que no tengan aristas, anclajes de grandes máquinas (estampadoras, cizalladoras, etc.). Las bóvedas de hormigón con cemento expansivo o con nervios de este material se descimbran solas con el aumento de la flecha. En las vigas armadas, suelos, etc., pueden producirse intencionadamente tensiones previas. Este tipo de cementos tiene, además, amplio campo de aplicación en las fundaciones, relleno de bóvedas de túneles, etc. En definitiva, las aplicaciones mas importantes de este tipo tan específico de cementos son las siguientes:

- Relleno de cimentación de maquinaria entre hormigón y placa en toda clase de máquinas (turbinas, motores, bombas, trenes de laminación, molinos, compresores, etc.).
- Relleno entre tuberías y paredes, fisuras y grietas, tuberías machiembradas, juntas de tuberías (metálicas o de cemento).
- Relleno de huecos o separaciones, incluso en elementos resistentes (por ejemplo, construcción de pilares nuevos para soportar vigas antiguas sin separación de ambos elementos por causa de retracciones).

- Revestimiento interior de tuberías de fundición y de acero.
- Anclaje de pernos.
- Anclaje de pilares.
- Anclaje de tubos pasantes, pasarelas, postes, raíles, etc.
- Reparación de desconches en pavimentos.
- Recubrir superficies de mortero para hacerlas mas resistentes a la abrasión, además de impermeables.
- Relleno de huecos, grietas, fisuras o coqueras en el hormigón.
- Apoyo de puentes y de grúas.
- Para mejorar el reparto de cargas entre zapatas y pilares, o estructuras en general.
- Rellenos sin retracción (armaduras postesadas adherentes, etc.).
- Rejuntado de paneles en fachadas.
- Gunitado de tableros rocosos, canales, tuberías, galerías, etc.
- Pavimentación industrial y de carreteras.
- Anclajes en roca (bulones, etc.).

Y ello sin más que aprovechar para tal fin las canteras de arcillas caolínificas pobres en caolín y no aprovechables para otros fines tecnológicos más rentables, el cual se activará térmicamente (a temperatura de unos 650°C a 750°C con enfriamiento brusco si fuera posible a  $\approx 0^\circ\text{C}$ ) antes de ser adicionadas a la fracción clínker portland correspondiente y regulador de fraguado ADECUADA, en cada caso, según las conclusiones del presente trabajo de Tesis Doctoral.

Finalmente y como aclaración se ha de decir que el FUNDAMENTO DE TODO LO EXPUESTO SOBRE EL CURADO DE ESTE TIPO DE HORMIGON HABRA DE SER INTEGRAMENTE APLICABLE A CUALQUIER OTRA PUZOLANA ya fuese alumino-silícica o sílico-alumino-sa, véase a propósito el Consejo Práctico XI, 34°.

### 13° Aplicación

Dada la composición química y constitución físico-química vítrea de la sílice hidratada amorfa y eminentemente reactiva,  $\text{SiO}_2$ , de esta puzolana D en forma de ópalo o geiserita, todas las Conclusiones, Deducciones, Consejos y Aplicaciones anteriores, pueden hacerse extensibles, sin más, en mayor o menor grado dependiendo del contenido de  $\text{SiO}_2$  respectivo, a aquellos materiales puzolánicos silícicos o mejor puzolanas "silícicas", ya sean:

(a) Naturales, como por ejemplo:

- las rocas más o menos diatomáceas, tales como: diatomita ( $\approx 90\% \text{SiO}_2$ ), trípoli ( $\approx 85\% \text{SiO}_2$ ), gaize ( $\approx 80\% \text{SiO}_2$ ), kieselgur ( $\approx 77\% \text{SiO}_2$ ), pseudo-kieselgur ( $\approx 70\% \text{SiO}_2$ ), moler ( $\approx 67\% \text{SiO}_2$ ), etc.,
- las rocas opalinas (3°) ó "geiseritas", tales como el ópalo noble, jilópalo, hialita, geiserita, silex (ó pedernal, jaspe), ágata, onix (u

ónice), calcedonia, etc.

- las tobas volcánicas "silícicas" ó puzolanas volcánicas "silícicas" tales como,

- . las cineritas, y entre ellas más concretamente la domita con más de un 70% de  $\text{SiO}_2$ ,
- . las traquitas ácidas y entre ellas principalmente las piroxénicas, y
- . ciertas pumicitas ó pumitas ó vulcanitas, etc.

(b) Artificiales, como por ejemplo: el humo de sílice ("sílica fume"), el producto resultante del tratamiento térmico ADECUADO (en forma,  $t^\circ$  y tiempo) de la perlita, las cenizas de la incineración ADECUADA de la paja y cáscara del arroz, etc.

#### 14ª Aplicación

Dada la composición química y constitución físico-química amorfa de esta puzolana M, y sobre todo de su fracción aluminica eminentemente reactiva,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$ , obtenida intencionadamente en este caso por calentamiento y enfriamiento adecuados y programados de un caolín cuarzoso, como se vió en su momento, todas las conclusiones anteriores pueden hacerse extensibles, sin más, en mayor o menor grado dependiendo del contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{r-}}$  respectivo, a aquellos otros materiales eminentemente aluminicos que bien per sé ó por tratamiento químico básico y/o ácido y/o tratamiento térmico, llegan a tener alúmina más o menos reactiva y/o lixiviable en notable cantidad, como pueden ser respectivamente,

(a) Naturales, como por ejemplo, las tobas volcánicas aluminicas ó puzolanas volcánicas aluminicas, y también feldespatos y feldespatoides diversos, y similares, y

(b) Artificiales, como por ejemplo, los restos bauxíticos y caoliniticos procedentes de la metalurgia extractiva de aluminio, a partir de bauxitas y caolines diversos, respectivamente, los restos de las industrias cerámicas y de refractorios y similares, las canteras pobres en caolín cuyo material constitutivo habrá de ser activado térmicamente a  $600^\circ\text{--}700^\circ\text{C}$  (dependiendo el tiempo de calentamiento de la cantidad de material a calcinar) antes de poder ser mezclado con cemento portland P ó PY, etc., habiéndose de tener en cuenta en su caso la cantidad de  $\alpha\text{-SiO}_2$  y su granulometría, dado que si dicho  $\alpha\text{-SiO}_2$  fuera muy grueso podría desaconsejarse su empleo para el fin perseguido citado, la materia prima silícica constitutiva de un crudo de cemento portland -en el supuesto de que la misma siendo caolinitica en mayor o menor grado ó quizás illítica incluso no pósee un contenido apreciable de caliza y/o dolomita- calcinada a  $t^\circ$  y tiempo de calentamiento adecuados en un horno paralelo distinto al de clinkerización, ó

bién quizás en los enfriadores, para convertirla en puzolana artificial tipo M de este trabajo o similar, etc.

-----

- (1\*) En cuyo caso se habrá de satisfacer al menos el valor característico de la RMF y/o RMC a la edad de 28 días, pero a la edad de 60, 90 y 180 días.
- (2\*) Al objeto de facilitar lo mas posible el acceso del hormigón recién preparado a TODOs los rincones del molde, por recónditos que los mismos resultaren, así como también tratar de evitar la formación de oquedades ó coqueras tan perjudiciales y mas para este tipo de hormigones, en el (los) elemento(s) hormigonado(s).
- (3\*) Las cuales no se deberán emplear como árido en exclusiva para confeccionar el hormigón, a no ser que se tomen las medidas preventivas adecuadas al caso, para evitar en lo posible desperfectos ulteriores por reacción árido-álcali, que no por formación de ettringita y/o AFm expansivas.
- (4\*) En ambos casos, tendría que cumplimentarse adecuadamente también quizás, el ensayo de las agujas de Le Chatelier (1).
- (5\*) Ello conllevaría por tanto además, que mientras LA ADECUADA podrá quizás estar comunmente mas condicionada por la especificación del ensayo de las agujas de Le Chatelier (1), LA MAXIMA, no.
- (6\*) ¡ Atención ! Dosifíquese el  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  O ADECUADAMENTE evitando la posibilidad de aparición de FALSO FRAGUADO.

XIV.- BIBLIOGRAFIA

#### XIV.- BIBLIOGRAFIA

- 1.- RC-75: Pliego de Condiciones Técnicas Generales para la Recepción de los Cementos; S.O.E. Nº 206, p.18197-18213 y Nº 207, p.18299-18311.
- 2.- PCCH-64: Pliego de Condiciones para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos, Normas y Manuales del IETcc, CSIC, Madrid-33 (1972).
- 3.- D.G. Miller, Ph.W. Manson y R.T. Chen: Bibliography on Sulfate Resistance of Portland Cements, Concretes and Mortars. (An annotation of articles reviewed before 1952), Documento Nº 708 del Archivo de la Miscellaneous Journal Series de la Universidad de Minnesota, U.S.A.
- 4.- J. Francis Young: Coord. Editor de CEMENTS RESEARCH PROGRESS, 1979, 1980, 1981, Published by Amer. Ceram. Soc., 65, Ceramic Drive, Columbus, Ohio, USA.
- 5.- R.W. Bogue: LA QUIMICA DEL CEMENTO PORTLAND.- Reinhold Publishing Co., New York, USA, (1955).
- 6.- ASTM C 150-84a.
- 7.- D.G. Miller y P.W. Manson: Proc. ASTM, V.40, 988-1006, (1940).
- 8.- F.R. Mc Millan, I.E. Stanton, I.L. Tyler y W.C. Hansen: Research Laboratories of PCA. Cap. I, II, III y IV, Bull. 26 (1948); Cap. V, Bull. 30 (1949).
- 9.- D.G. Miller y Ch.G. Snyder: Proc. ASTM, V.45, 165-194 (1945).
- 10.- J. Smeaton: "Narrative of the Building and a Description of the Construction of the Eddystone Lighthouse with Stone".- Londres (1913).
- 11.- D. Gaspar Tebar: Comunicación Privada.
- 12.- P. García de Paredes: I Coloquio Internacional sobre las Obras Públicas en los Terrenos Yesíferos, Comunicación C. 4-9 del Tomo III, Madrid (1965).
- 13.- Primeras Jornadas de Durabilidad: Materiales de Construcción (Mat. Constr.) Nos. 150 y 151, IETcc, Madrid (1973).
- 14.- J. Calleja: Mat. de Constr., Nº 180, p.17-45, IETcc, Madrid (1980).
- 15.- P. García de Paredes: Comunicación Privada.
- 16.- W.C. Hansen: Highway Research Record, Nº 13, (1966).
- 17.- F.M. Lea y C.H. Desch: QUIMICA DEL CEMENTO Y EL HORMIGÓN.- 3ª Ed., Edward Arnold Editors, Londres (1970).
- 18.- P.K. Mehta y O.E. Gjérsv: Journal for Testing and Evaluation, JTEVA, 2, (6), 510-15, (1974).
- 19.- D.G. Miller y P.W. Manson: USDA; Tech. Bull., Nº 358, 1-80, (1933).
- 20.- R.E. Davis, J.W. Kelly, G.E. Troxell y H.E. Davis: Jour. Am. Concr. Inst. (J.A.C.I.), 7, (1) 80-114, Sept-Oct. (1935); Proc. ASTM Vol.32.
- 21.- L.H. Tuthill: J.A.C.I., 8, (2), 83-106, Nov.-Dic. (1936); Proc. ACI, V.33.
- 22.- R.W. Davis, R.W. Carlson, J.W. Davis y H.E. Davis: J.A.C.I., 9, (2), 90-110, May.-Jun. (1937) Proc. ACI, V.33, p.577.
- 23.- G.L. Kalousek y C.H. Jumper: J.A.C.I., 15, (2), 145-163, Nov. (1943); Proc. ACI, V.40.
- 24.- R.F. Blanks: J.A.C.I., 21, (2), 89-108, Oct. (1949); Proc. ACI, V.46.
- 25.- Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes; First Pacific Area National Meeting; ASTM Special Techn. Publ. Nº 99, Oct. (1949), San Francisco, California, USA

- 89.- M.L. Strelkov: Reps. of Symp. on the Chem. of Cement, et. P.P. Budnikow et al., p.183, (1956). Slavic Language Microfilm no. R-02318 and Chem. Abstrs., 52, 6748, (1958).
- 90.- A. Bentur y M. Ish-Shalom: Part.I : C.C.R., 4, (4), 519-532, (1974).  
Part.II : C.C.R., 4, (5), 709-21, (1974).  
Part.III: C.C.R., 5, (2), 139-152, (1975).  
Part.IV : C.C.R., 5, (6), 597-606, (1975).
- 91.- P.K. Mehta: J.A.C.S., 56, (6), 315, (1973).
- 92.- P.K. Mehta: J.A.C.S., 51, (3)(4), 179-81, (1978).
- 93.- A. Negro y A. Bachiorrini: C.C.R., 12, (6), 577-84, (1982).
- 94.- A. Rosetti, G. Chiochio y A.E. Paolini: Part.I : C.C.R., 12, (5), 577-85, (1982).  
Part.II: C.C.R., 12, (6), 667-76, (1982).
- 95.- G.F. Becker y W.L. Day: Proc. Washington Academy of Sciences, 7, 232, (1905).
- 96.- S. Taber: Am. J. Sci., 41, 532, (1916).
- 97.- G.L. Malousek y E. J. Benton: J.A.C.I., Proc., 57, 187-92, (1970).
- 98.- S. Chatterjee: C.C.R., 4, (4), 685, (1974).
- 99.- P. Seligmann y M.R. Greening: Portland Cement Associat. (P.C.A.), Bull. Nº 185.
- 100.- B.T. Kennedy: Proc. ASTM, V.61, 1035-38, (1961).
- 101.- W.C. Hansen: Proc. ASTM, V.61, 1038-42, (1961).
- 102.- X. Jua-Gan, Ch.-Mao, T. Xue-Li, Z. Yu-Ping y X. Ji-Zhi: 7º Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, Vol. III, p.V-33 a V-39, Paris, (1980).
- 103.- A. Lafuma: Le Ciment, 30, 175, (1925).
- 104.- H.H. Steinour: Chemical Reviews, 40, 451, (1947).
- 105.- R. Turriziani, A. Rio y A. Celani: L'Industria Italiana del Cemento, ANNO XXXII, Nº 5, 313-20, (1962).
- 106.- A.E. Moore: Silicates Industriales, 32, (3), 87-92, (1967).
- 107.- W. Lucas: C.C.R., 6, (2), 228-29, (1976).
- 108.- S. Diamond y E.E. Lachowski: C.C.R., 13, (3), 335-40, (1983).
- 109.- Handbook of Chemistry and Physics, 31ª ed.; Ed. Charles O. Hodgman, M.S., Cleveland, Ohio, USA.
- 110.- W.C. Hansen: Discusión del trabajo de G. Malquori expuesto en la cita (200).
- 111.- W.C. Hansen: PERFORMANCE OF CONCRETE P.50-51, Symp. in Honour of T. Thowaldson, Tch. Ed., E.G. Swenson, Universidad de Toronto Press, Canada, (1968).
- 112.- P.K. Mehta: C.C.R., 6, 597, (1976).
- 113.- M. Murat: Part.I : C.C.R., 13, (2), 259-66, (1983).
- 114.- V.S. Ramachandran: Nature, 201, 288-89, (1964).
- 115.- D.R. Glasson: J. Applied Chem., (10), 38, Londres, (1960).
- 116.- W.C. Hansen y E.E. Pressler: Ind. and Engineering Chemistry, 39, (10), 1280-82, (1947).
- 117.- H. El-Didamony, M. Mostafa y M. Mostafa: C.C.R., 6, (5), 707-10, (1976).
- 118.- M. Collepardi, G. Baldini y M. Pauri: C.C.R., 8, (6), 741-51, (1978).

- 119.- W.C. Hansen y S.J. Offut: U.S. Gypsum Co., Chicago, USA, (1962).
- 120.- J. Calleja: 7º Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, V.I, P.VII-219, Paris, (1980).
- 121.- W. Collepardi, S. Moroni, G. Moriconi y M. Corradi: C.C.R., 9, 431-37, (1979).
- 122.- A. Boning y B. Cariou: 7º Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, V.III, P.V-158 a V-163, Paris, (1980).
- 123.- S. Chatterjee: 7º Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, V.IV, P.586-91, Paris, (1980).
- 124.- J. Calleja: Materiales de Construcción nº 180, p.17-74, Oct-Nov-Dic., 1980.
- 125.- M. Fukuhara, S. Goto, K. Asaga, M. Daimon y R. Kondo: C.C.R., 11, 407-14, (1981).
- 126.- Special Subcommittee of ASTM Committee C-1 "How Many Specifications for Cement".- ASTM Bull. nº 102, p.39, (1940).
- 127.- A.A. Baikov y A.S. Tumarev: Chem. Abst., 31, 8863-67, (1936).
- 128.- T. Merriam (I): Eng. News Record, 93, 668, (1924) y Mat. Constr. nº 170, 67-89, Abril-Mayo-Junio (1978) y final del trabajo expuesto en la cita (9).
- 129.- E.C. Higginsen y O.J. Glantz: Proc. ASTM, V.53, p.1009, (1953).
- 130.- A. López Ruiz: LCENIC, Publ. nº 77, Madrid, (1951).
- 131.- L.W. Tuthill: ASTM STP nº 169, p.186-200, (1955).
- 132.- YuF. Thaspulatov y F.L. Glekel: Ceramic Abstracts 1959/IX y J.A.C.I., 31, (8), 799, II/60.
- 133.- R. Turriziani y A. Rio: L'Industria Italiana del Cemento, ANNO XXVII, nº 6, p.145-151, (1957).
- 134.- J. Chapelle: Rev. Mat. Constr. Trav. Publ., Nos. 511, 512, 513, 514, 515 y 516, (1958).
- 135.- M.F. Ferrari: Rev. Mat. Const. Trav. Publ., nº 510, p.83-86, (1959).
- 136.- A. Rio, A. Celani y L. Angeletti: L'Industria Italiana del Cemento, ANNO XXXI, (4), 184-93, (1961).
- 137.- J. Jambor y S. Casapis: J.A.C.I., 64, (7), 525, (1967).
- 138.- J. Calleja: Cemento y HORMIGÓN, nº 386, (1966).
- 139.- F. Soria: I Premio LUXAN de Puzolanas, Madrid, (1967).
- 140.- M. de Luxan B.: Informes de la Construcción del IETCC, ANNO XX, nº 196, 61-74, (1967).
- 141.- J. Calleja: II Premio LUXAN; ION, Vols. XXIX y XXX, Nos. 340, 341, 343 y 344, (1968).
- 142.- I. Biczok: CORROSION Y PROTECCION DEL HORMIGÓN; Ed. URMO c/ Espartero, 10, Bilbao, España, (1972).
- 143.- M.P. Luxan: Tesis Doctoral Univ. Complutense, Madrid (1975).
- 144.- K. Mather: Cement Standards, Evolution and Trends, P.K. Mehta Editor, ASTM STP 663, p.74-86, (1978).
- 145.- L. Blondiau: Rev. Mat. Constr., XI, 261-65, (1935).
- 146.- ESTUDIO DE MATERIALES, 83ª ed., IETCC, Madrid 1976: IV.- Conglomerantes Hidráulicos, F. Soria, p.178.
- 147.- K. Mather: 7º Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, Vol. IV, p.580-85, Paris (1980).
- 148.- J. Grzymek, M. Roszczynalski y K. Gustaw: 7º Congrès Inter. de la Chimie des Ciments, Vol. I, p. IV-66 a IV-71, Paris, (1980).
- 149.- C. Samanta y N.K. Chatterjee: C.C.R., 12, (6), 726-34, (1982).



- 150.- E.V. Sorensen: Silicates Industriales, Tome XLVII, Nº 10, p.223-28, (1982).
- 151.- H.W. Bradbury: Silicates Industriales, Tome XLVII, Nº 12, p. 283-88, (1982).
- 152.- C. Barba: Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Químicas, Univ. Complutense, Madrid, (1968).
- 153.- ASTM C 595-76.
- 154.- ASTM C 311-77.
- 155.- "ASINEL" = ASOCIACION DE INVESTIGACION INDUSTRIAL ELECTRICA: "Las Cenizas Volantes y sus Aplicaciones".- Selecciones Gráficas (Ediciones); p.267-89, Paseo de la Dirección, 52, Madrid, (1970), equivalente a la ASTM C 114 para idéntico fin.
- 156.- 7º Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, Vol.IV, Tome IV: "Structure of puzzolans and fly-ash in the hydration of puzzolanitic and fly-ash cements", Paris, (1980).
- 157.- A. Verhasselt: 7º Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, Vol. III, p.IV-117 a IV-121.
- 158.- M. Venuat y M. Papadakis: CONTROL Y ENSAYOS DE CEMENTOS, MORTEROS Y MORTIGONES; Ed. URMO, c/Esparteros nº 10, Bilbao, España, (1966).
- 159.- F. Massazza: 7º Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, Vol. IV, p.85-96, Paris (1980).
- 160.- ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE: Manual of Concrete Practice, Part 1, p.201-12, (1979).
- 161.- H.F.W. Taylor: LA QUIMICA DE LOS CEMENTOS, Vol. I y II, Ed. URMO, c/Esparteros, 10, Bilbao, (1971).
- 162.- U. Tosco: ATLAS DE BOTANICA, Parte 1ª y 2ª.- Inst. Geográfico de Agostini, Ed. Teide S.A., c/Viladomat, 291, Barcelona-15, (1973).
- 163.- P. Font Quer: DICCIONARIO DE BOTANICA, p.119-120, Ed. Labor.A., Madrid (1953).
- 164.- F. Tomás: Proc. of the Seventh Conference on the Silicate Industry (Siliconf, 1963).- Akademiai Kiado; Publ. House of the Hungarian Academy of Sciences, p.601, Budapest, Hungría, (1965).
- 165.- SILICATE SCIENCE, Vol.V, Ceramics and Hydraulic Binders, p.490, Acad. Press New York, Londres, (1966).
- 166.- R.W. Grimeshaw: THE CHEMISTRY AND PHYSICS OF CLAYS AND ALLIED CERAMIC MATERIALS, 4ª ed. rev., Pub. Ernest Benn Limited, Londres, (1971).
- 167.- P. Lapoujade y P. Vogain: Bull. Soc. Fran. Ceram., (28), 3-12, (1955).
- 168.- M. Nara y M. Inoue: 7º Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, Vol.III, p.IV-13 a IV-18, Paris, (1980).
- 169.- L. Huakun, L. Zhongya y L. Shengjiao: 7º Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, Vol.III, p.IV-7 a IV-12, Paris, (1980).
- 170.- A. López Ruiz: Publ. Nº 85, LCENC, Madrid, (1955).
- 171.- A. López Ruiz: Publ. Nº 84, LCENC, Madrid, (1955).
- 172.- R. Terriziani y G. Schippas: La Rievista Scientifica ANNO 242, (2), 366-73, (1954).
- 173.- M.C. Gandy y L.M. Bultz: J.A.C.S., 48, (7), 384-88, (1966).
- 174.- M. Murat: (M. Murat y C. Comolli) Part.I : C.C.R., 13, (2), 259-66, (1983).  
Part.II : C.C.R., 13, (4), 511-18 (1983).  
Part.III: C.C.R., 13, (5), 631-37, (1983).

- 175.- R. Dron: 7<sup>e</sup> Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, Vol. IV, p.85-96, Paris, (1980).
- 176.- Silicates Industriels, Tome XLVII, (8), 143-59, (1982).
- 177.- S.J. May y W.F. Cole: C.C.R., 12, (5), 811-17, (1982).
- 178.- P. Necke: *Yenindustrie-Zeitung*, 54, 444-46, (1930).
- 179.- A. Ferrari: *Yenindustrie-Zeitung*, 59, 316, (1935).
- 180.- G. Malqueri y F. Sasse: *La Ricerca Scientifica*, 6 (II), 3, (1935).
- 181.- G. Malqueri y S. Spadanes: *La Ricerca Scientifica*, Vol. 7, 185-91, (1936).
- 182.- R. Paravane y V. Caglietti: *Atti Reale Acad. Italia*, 3, 295, (1937).
- 183.- P.P. Budnikov: *Kommunalnoe Stroitelstvo*, (9), 8-14, (1938).
- 184.- M. Ratousek y Z. Sausan: C.C.R., 4, (1), 113-22, (1974).
- 185.- C.C.R., 11, (1), 29-40, (1981).
- 186.- P.K. Mehta y M. Polivka: *DURABILITY OF CONCRETE*, Publ. Aci, SP-47; p. 367-79, P.O. Redford Station, Detroit, Michigan, USA, (1975).
- 187.- R.Terriziani y G. Schippa: *Ric. Scientif.*, 26, 3387, (1956).
- 188.- R.Terriziani: *Silicates Industriels*; 23, (181), 285, (1968).
- 189.- A. Ch. Giberques, B. Thenez y A. Vaguier: 7<sup>e</sup> Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, Vol. III, p. IV-53 a IV-59, Paris (1980).
- 190.- W. M. Gontzsoech, D.M. Roy y E.B. Scheetz: C.C.R., 11, (3), 291-94, (1981).
- 191.- J.M.P. Van Aardat y S. Visser: C.C.R., 8, (8), 877-81, (1978).
- 192.- O.M. Braga Neis: C.C.R., 11, 541-47, (1981).
- 193.- P.K. Mehta: Una discusión del trabajo expuesto en la cita (182).- C.C.R., 4, (4), 683-84, (1974).
- 194.- M. Ratousek y Z. Sausan: Una réplica a las Discusiones de las citas (98) y (191).- C.C.R., 4, (4), 687-88 (1974).
- 195.- J.V. Karpinski: *Rev. Nat. Constr. Trav. Publ.*, Nº 510, (1958).
- 196.- R. Terriziani y A. Rie: *Proc. of the Tenth Inter. Symp., Nat. Bur. of Standards, NBS, Monograph 43, Vol. II, Paper VIII, 54, p. 1067-73, Washington (1980).*
- 197.- J. Calleja y D.J. Veronelli: *Nat. de Constr. del IETCC*, Nº 180, p. 5-13, act-nov-dic (1980).
- 198.- P.K. Mehta (Communicated by J. Skalny): C.C.R., 11, (4), 507-18, (1981).
- 199.- L. Blendian: *Rev. Nat. Constr. Trav. Publ.*, III, Nº 524, Nº 546 (1981).
- 200.- A. Staepoe: *Rev. Nat. Constr. Trav. Publ.*, 88 (279), 493, (1932).
- 201.- E.P. Flint y L.S. Wells: *Jour.Ref. Nat. Bur. Standards*, (27), 171, (1944), RP 1411.
- 202.- G. Malqueri: *Proc. of the Fourth Intern. Symp. on the Chemistry of Cements.- Monograph 43; Vol.II; p. 983-1006, Washington (1980).*
- 203.- W. Kurdowski: 7<sup>e</sup> Congrès Intern. de la Chimie des Ciments, Vol. I, p.V-2/1 a V-2/10, Paris (1980).
- 204.- J. Bonetát: Discusión del tema publicado por M.P. de Luxan y F. Soris: C.C.R., 5, 481, (1975).- C.C.R., 7, (4), 481-82, (1977).

- 205.- M.P. de Luxan y F. Soria: Una réplica a la discusión de J. Bensted de cita (204).- C.C.R., 7, (4), 463-64, (1977).
- 206.- J. Calleja: Mat. de Constr. del IETCC, Nº 165, enero-febrero-marzo (1977).
- 207.- T. Takemoto, M. Uchikawa, S. Uchida: 7º Congreso Intern. de la Ciencia de los Cementos, Vol. I, p. IV 2/1 a IV 2/29, París (1980); Vol. III, p. IV-24 a IV-29, París (1980).
- 208.- M.J.M. Jaspers: Rev. Mat. Const. Trav. Publ., VI, Nºs. 633 y 634, (1968).
- 209.- F.M. Lea: Symp. on the Chemistry of Cements, p. 460-504, Estocolmo, Suecia, (1938) - and Discussion.
- 210.- W. Lerch, F.M. Hveem, W.S. Weaver, D.G. Miller, E.J. Wechter y E.G. Swenson: Reported by the Working Committee on Sulfate Resistance of ASTM Committee C-1 on Cement; Bull. Nº 212, p. 37-44 (1956).
- 211.- H. Woods: SP-47 de la ACI: Publicado conjuntamente por ACI Detroit, Michigan y la Universidad del estado de Iowa, USA.
- 212.- P. García de Paredes: Parte I : Mat. de Constr. Nº 163, julio-agosto-sept (1976).  
Parte II: Mat. de Constr. Nº 165, enero-febrero-marzo (1977).  
Parte III: Mat. de Constr. Nº 170, abril-mayo-junio (1978).  
Parte IV: Mat. de Constr. Nº 171, julio-agosto-sept (1978).
- 213.- W. Lerch: Proc. of the ASTM, Vol. 61, p. 1043-1051 (1961).
- 214.- J.T. J-govic: Comunicación Privada.
- 215.- ASTM C 452-63 T = ASTM C 452-68.
- 216.- P.K. Mehta: J.A.C.I., Proc. 72, (10), 573-95 (1975).
- 217.- R. Talero: Mat. de Constr. del IETCC Nº 177, enero-febrero-marzo (1980).
- 218.- P. Seligmann: Comunicación Privada (1982).
- 219.- T. Merriam: Eng. News Record, 104, p. 62 (1930) y Fort-Peck, Dam. Specifications (1933).
- 220.- Le Chatelier-Anstett: Rev. Mat. Constr. Trav. Publ., 162, 49-52, (1923).
- 221.- A. Steopoe: Ciment si Beton, XI y XII, p. 231 (1935), Rumania.
- 222.- T. Thorvaldsen, D. Molochoy y V.A. Vigfusson: Can. Jour. of Res., 6, 487-517 (1932).
- 223.- W.C. Taylor y R.W. Bogue: Jour. of Research of the Nat. Bur. of Standards, 45, (3), 223-231, RP 2128, (1950).
- 224.- Y. Hegermano: Zement, Nº 14, (1957).
- 225.- A. Koch y Steinegger: Zement-Kalk-Crips, 13, (7), 317-32 (1960).
- 226.- W. Mittekandt: Zement-Kalk-Crips, 13, (12), 565-72, (1960) y en ref. (210).
- 227.- A.S. Marquestad: TR 19A/383, Cement and Concrete Association, Londres, Nov. (1964) y Zement-Kalk-Crips, 9, 415-25 (1972).
- 228.- N. Nedu: Standardizarea, XII, p. 637-42, (1966).
- 229.- V. Simpliceanu: Hidrotehnic, VIII, (1968), Rumania.
- 230.- J. Orth: Bull. RILEM, X, p.35, (1968).
- 231.- J. Eustache y R. Magnan: J.A.C.S., 55, (5), 237-39 (1972).
- 232.- J.A. Forrester: "Discussion en paper by Steele and Havusson" in RILEM Symp. on Durability of Concrete, p. C 199-208, Praga (1970).

- 233.- P.W. Brown: C.C.R., 11, (5/6), 719-27, (1981).
- 234.- P. García de Paredes: Comunicación Privada.
- 235.- Norma STAS - E 2633-67, Rumanía.
- 236.- Norma NEN 1591 ó N 1591 de Junio de 1953, Holanda.
- 237.- Norma CSN.CSN 773-56, Checoslovaquia.
- 238.- Norma DIN 52.111, Alemania Federal.
- 239.- Norma ASTM C 452-75 = ASTM C 452-83.
- 240.- Norma GOST 4798-49, Rusia.
- 241.- ASTM C 452-80T
- 242.- F. Basilio: Comunicación Privada (1980).
- 243.- J. Calleja y M. Aguanell: Mat. de Constr. del IETCC nº 179 (1980).
- 244.- J.F. Colina y M. Mainsztein: Ingeniería X, nº 41, 121-130, (1963), Buenos Aires.
- 245.- N.J.-M. Jaspers: Rev. Mat. Constr. Trav. Publ., Nº 856, p.135-43, (1970).
- 246.- P. García de Paredes: Cuadernos de Investigación del IETCC Nº 12, Dic. (1967).
- 247.- J. Calleja y P. García de Paredes: Mat. de Constr. del IETCC, Nº 137, (1970).
- 248.- J. Puig: Comunicación Privada.
- 249.- J.L. Sagrera: Mat. de Constr. Nº 140, Oct.-Nov.-Dic., (1970).
- 250.- D.G. Miller y P.W. Manson: Tch. Bull. 194, University of Minnesota Agricultural Experiment Station, May. 1951.
- 251.- J. Calleja: Mat. de Constr., IETCC Nº 120, p.41-56, Oct.-Nov.-Dic., (1965).
- 252.- P. García de Paredes: Cuadernos de Investigación del IETCC, Nº 12, (1967).
- 253.- J.M. Fernandez París: Mat. de Constr. del IETCC, Nos. 150 y 151, p.275-283, (1973).
- 254.- V. Lach y M. Rosova: 7º Congrès Internat. de la Chimie des Ciments, Vol. IV, p.776-81, París (1980).
- 255.- G. Sudoh, T. Ohta y H. Harada: 7º Congrès Internat. de la Chimie des Ciments, Vol. III, p. V-152 a V-157, París, (1980).
- 256.- K. Ogawa y O.M. Roy: Part.I : C.C.R., 11, (7), 741-50, (1981).  
Part.II : C.C.R., 12, (1), 101-09, (1982).  
Part.III: C.C.R., 12, (2), 247-56, (1982).
- 257.- M. P. de Luxán y T. Vazquez: El Cemento ANHO 71, Julio-Sep., (1974).
- 258.- M. P. de Luxán: Mat. de Constr. nº 161, Enero-Feb.-Marzo, 1976.
- 259.- M. de Luxán B.: Cemento y Hormigón Nº 364, p.377-385, Julio (1964).
- 260.- T. Fris-Gacasa, M. Blazevic y V. Grba: Parte 1ª : Cemento y Hormigón nº 588, p.973-88,(1982)  
Parte 2ª : Cemento y Hormigón nº 589, p.1074-86(1982)
- 261.- M. Regourd, B. Mortureux, E. Gautier, M. Hornain y J. Volant: 7º Congrès Internat. de la Chimie des Ciments, Vol. II, p.III-105 a III-111, París (1980).
- 262.- G. Valquori: Giornale Chim. Applie., Vol.12, 312, (1930).
- 263.- P.K. Mehta y S. Wang: C.C.R., 12, (1), 121-122, (1982).
- 264.- ASTM C 778-74T, ASTM C 471-75 y ASTM C 305.

- 265.- R.C. McKenzie: THE DIFFERENTIAL THERMAL INVESTIGATION OF CLAYS: Mineralogical Society (Clay Minerals Group) p. 126, London, (1957).
- 266.- ASTM C 109-80
- 267.- ASTM C 230.
- 268.- ASTM C 490-74.
- 269.- J. Calleja: Materiales de Construcción nº 186, p.11-35, Madrid, Abril-Mayo-Junio 1982.
- 270.- A.K. Chakraborty y D.K. Ghosh: J.A.C.S., Vol. 61, nº 3-4, p.170-173, Mar.-Apr. 1978.
- 271.- D.A.E. Veronelli: Materiales de Construcción nº 171, p.5-33, Julio-Agosto-Sept. 1978.
- 272.- R.E. Farris y J.S. Masaryk: Ceramic Processing Before Firing, p.277-287, Ed. by G.Y. Onoda y L.L. Mench, Wiley Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York (1978).
- 273.- K.M. Parker y J.S. Sharp: Transactions and Journal British Ceramic Society, Vol. 81 (2), 29-56, (1982).
- 274.- Abdel Aziz A. Khalil: C.C.R., Vol. 12, nº 1, p.21-24, Enero (1982).
- 275.- B. Mortureaux, M. Meornain y M. Regourd: 7º Congrès Internat. de la Chimie des Ciments, Vol. IV, p. 570-574, Paris (1980).
- 276.- J.M. Fernández París y C.F. Baquedano Coll: Manuales y Normas del IETCC, p.55-58, Abril 1970, Madrid.
- 277.- OFICEMEN: "Investigación del ahorro energético en la producción del cemento"
- 278.- P. García de Paredes: Manuales y Normas del IETCC, Madrid.
- 279.- P. García de Paredes: Manuales y Normas del IETCC, Madrid.
- 280.- P. García de Paredes: Manuales y Normas del IETCC, Madrid.
- 281.- D. Gaspar Tebar: Mat. de Constr., p.9-30, nº 162, (1976).
- 282.- F. Soria: Mat. de Constr., p.69-84, nº 190-191, (1983).
- 283.- S. Takashima y F. Amano: Rev. of the 14º Gral. Meeting; Tokyo, pp.19-22, (1960).
- 284.- J.R. Hurtado: QUÍMICA Y MICROBIOLOGÍA DEL AGUA.- Instituto Nacional de Obras Sanitarias; Tip. Vargas, S.A., Caracas, (1956).
- 285.- R.A. Nyquist y R.O. Kagel: INFRARED SPECTRA OF INORGANIC COMPOUNDS.- Academic Press, New York and London, (1971).
- 286.- J.A. Gadsden: INFRARED SPECTRA OF MINERALS AND RELATED INORGANIC COMPOUNDS.- Butterworth 161 Ash Street Reading, Mas. 01867, USA.
- 287.- Mº P. de Luxán: Cuaderno de Investigación nº 32 del IETCC, Marzo 1976.
- 288.- V.S. Ramachandran: APPLICATIONS OF DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS IN CEMENT CHEMISTRY.- Chemical Publishing Company, Inc. New York, 1969.
- 289.- ASTM C 227-71.
- 290.- R. Talero: Memoria del trabajo realizado bajo el patrocinio de la Fundación "Juan March", en imprenta.
- 291.- J.L. Alonso Ramirez: Tesis Doctoral, p.273-278; Factd. Ciencias, Sec. Químicas, Marzo 1966, Madrid.- Publicación nº 199 del Laboratorio Central de Ensayos de Materiales de Construcción (actual CEDEX).
- 292.- J. Calleja: Mat. de Constr. nº 190-191, p.25-52, IETCC, Madrid (1983).
- 293.- A. Kleinlogel: INFLUENCIAS FÍSICO-QUÍMICAS SOBRE LOS HORMIGONES EN NASA Y ARMADOS.- Ed. Labor, S.A., Barcelona-Madrid (1955).
- 294.- MLI-154/78: Densidad Relativa y Absorción de Aridos Finos.- Norma de Ensayo del Laboratorio de Transporte y Mecánica del Suelo "José Luis Escario".-Madrid (ver MLI-204/78 y UNE 7140a).
- 295.- S: Nota: Comunicación Privada.